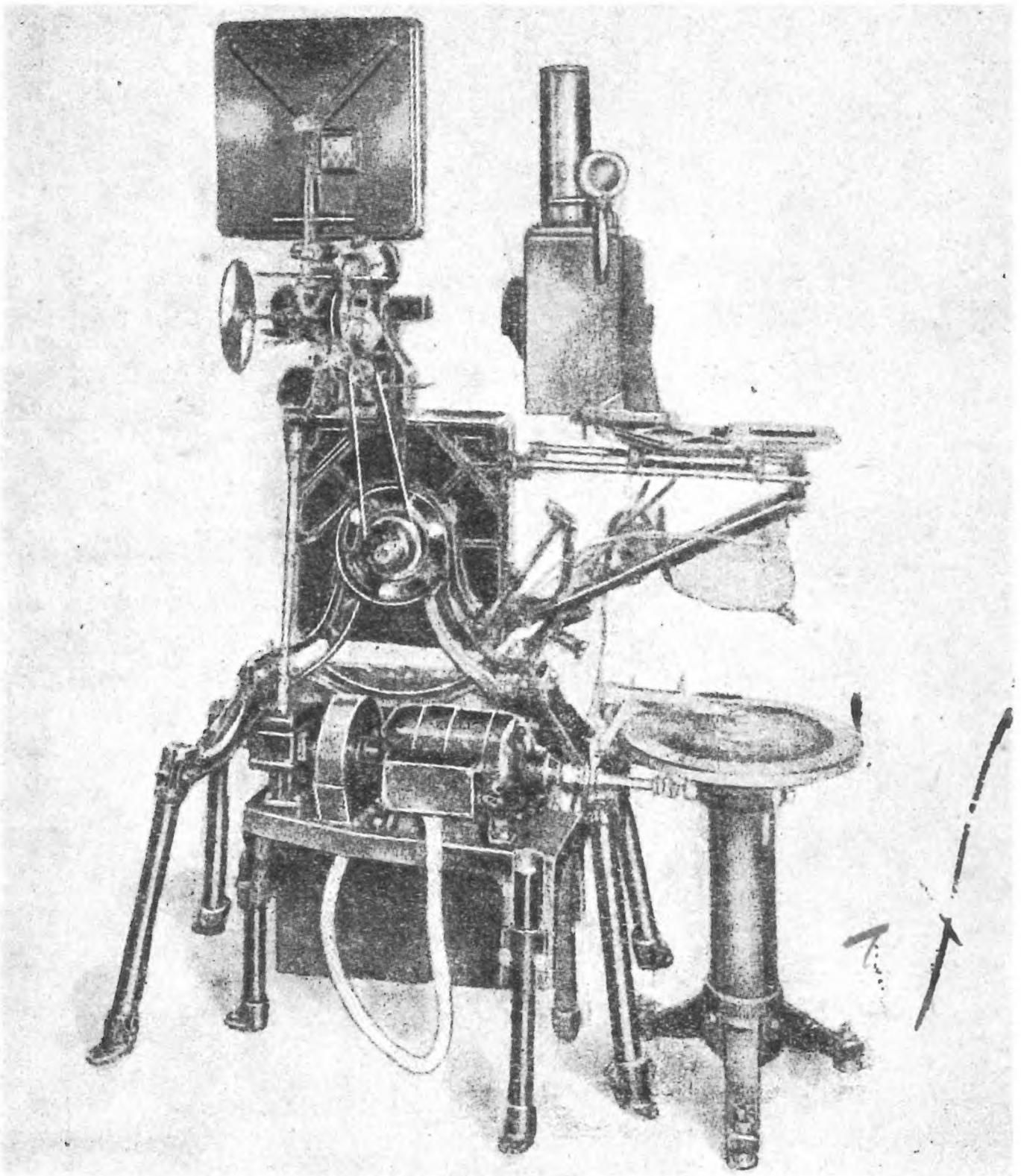
Р. А. МИЛЛИКЕН
И
Г. Г. ГЭИЛ

ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УЧЕБНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО
1931

2 р. 70 к. Переплет 30 коп.



ЗВУКОВОЕ КИНО.

Этот замечательный аппарат является комбинацией обыкновенного киноаппарата и фонографа. Кино-аппарат и фонограф приводятся в движение одним и тем же мотором, снабженным особым приспособлением для обеспечения постоянства скорости до 0,1%. На фонографе имеется пластинка, точно синхронизованная с фильмом. Колебания иглы фонографа приводят в движение маленькую катушку в магнитном поле, генерируя, таким образом, электрический ток с частотой музыкальных звуков или речи. Этот ток усиливается и затем попадает в громкоговоритель. На пластинках и фильмах есть особые отметки, благодаря которым их легко можно запускать одновременно. Все части этого аппарата сделаны с чрезвычайной тщательностью.

Р. А. МИЛЛИКЕН и Г. Г. ГЭЙЛ

ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ

ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО
Б. ФИНКЕЛЬШТЕЙНА и А. ШЕХТЕР

С 549 РИС. В ТЕКСТЕ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧЕБНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1931 ЛЕНИНГРАД

Scan AAW

У,24. Гиз № 36793/л.
Ленинградский Областлит № 71567.
$24^{8}/_{4}$ л. Тираж 10 000. Зак. № 585.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие авторов 7

Глава I. Измерения 9
Основные единицы (9). Плотность (13).

Глава II. Давление в жидкостях 15
Давление на жидкости (15). Закон Паскаля (19). — Закон Архимеда (24).

Глава III. Давление в воздухе 30
Барометрические явления (30). Упругость воздуха (36). Пневматические приборы (41).

Глава IV. Движение молекул 49
Кинетическая теория газов (49). Движение молекул в жидкостях (52). Движение молекул в твердых телах (52).

Глава V. Движение и силы 53
Определение и измерение сил (53). Сложение сил (55). Тяготение (61). Падение тел (65). Законы движения Ньютона (78).

Глава VI. Молекулярные силы 84
Упругость. Молекулярные силы в твердых телах (84). Молекулярные силы в жидкостях. Капиллярные явления (86). Абсорбция газов твердыми и жидкими телами (93).

Глава VII. Работа и энергия 95
Определение и измерение работы (95). Работа, приложенная к системе блоков и совершенная ею (96). Работа и рычаг (99). Закон работ (105). Мощность и энергия (109). Трение (114). Полезное действие (116).

Глава VIII. Термометрия. Коэффициенты расширения 120
Термометрия (120). Коэффициент расширения газов (125). Расширение жидкостей и твердых тел (128). Применение теплового расширения (131).

Глава IX. Работа и тепловая энергия 132
Механический эквивалент тепла (132). Теплоемкость (138).

Глава X. Изменение состояния 140
Плавление (140). Испарение и свойства паров (144). Гигрометрия или изучение влажности атмосферы (148). Кипение (154). Паровые машины (162). Двигатели внутреннего сгорания (168).

Глава XI. Распространение теплоты. 176
Теплопроводность (176). Конвекция (179). Излучение (180). Отопление и вентиляция здания (181).

Глава XII. Магнетизм 186
Общие свойства магнитов (186). Земной магнетизм (192).

Стр.

Глава XIII. Электростатика 196
Основные явления (196). Распределение электрических зарядов на проводниках (203). Потенциал и емкость (206).

Глава XIV. Электричество в движении 213
Обнаружение электрического тока (213). Химические действия тока; электролиз (217). Магнитные действия тока; свойства катушек (220). Измерение электрических токов (224). Электрический звонок и телеграф (227) Сопротивление и электродвижущая сила (230). Закон Ома (235). Первичные элементы (238). Вторичные элементы (246). Тепловые действия электрического тока (248).

Глава XV. Индукционные токи 253
Основы устройства динамомашин и двигателей (253). Динамомашины (259). Индукционная катушка и трансформатор (268).

Глава XVI. Природа и распространение звука . . 278
Скорость и природа звука (278). Отражение, усиление и интерференция (286).

Глава XVII. Свойства музыкальных звуков 293
Музыкальные гаммы (293). Колебания струн (295). Основные тона и обертоны (297). Духовые инструменты (303).

Глава XVIII. Природа и распространение света . 308
Распространение света (308). Освещение и фотометрия (311). Волновая теория света (314). Преломление света (318).

Глава XIX. Построение изображений 325
Изображения, полученные с помощью чечевиц (325). Изображения, полученные с помощью зеркал (331). Оптические приборы (337).

Глава XX. Явления цвета 347
Цвет и длина волны (347). Спектры (354).

Глава XXI. Невидимые излучения 358
Излучение от нагретого тела (358) Электрические излучения (361). Катодные и рентгеновы лучи (375). Радиоактивность (379). Развитие физики за последние 30 лет (383).

Приложение 386

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРОВ.

Никогда еще ни одна наука не развивалась так быстро и не изменялась так радикально, как физика за последние тридцать лет. Прежде эту область знания принято было считать сухой. Теперь же она привлекает всеобщий интерес.

Учитывая это, авторы старались выбросить из этой книги все устаревшее и полностью использовать свой двадцатилетний педагогический опыт, а также опыт десятков тысяч учителей, стремившихся вместе с ними улучшить преподавание физики.

Основным стремлением авторов было дать такое изложение элементарной физики, которое побуждало бы учащегося самого подумать о разных «почему» и «отчего» того физического мира, в котором он живет.

Отсюда — выбор материала. В книгу введено только то, с чем тесно соприкасается средний ученик в повседневной жизни. Одним словом, авторы старались дать в книге физику обыденной жизни, помогающую всякому среднему человеку разбираться в окружающих условиях и правильно истолковывать свой собственный опыт.

Что касается метода, авторы остановились на систематическом, тщательно выбранном и многократно проверенном на опыте курсе, в противоположность энциклопедическому набору разнородных фактов.

Этот курс, в самом кратком изложении, напечатан крупным шрифтом. В него вошло самое необходимое. Он представляет собой как бы скелет того изложения, которое обычно дается в школах, где на физику отведено самое минимальное время. Задачи, являющиеся центральным ядром всякого курса, подобраны именно с таким расчетом.

Для школ, располагающих бо́льшим запасом времени и могущих проработать предмет более основательно, предназначен курс, состоящий из крупного и мелкого шрифта, а также собрание задач, вошедших в Приложение.

В дополнение к этим двум систематическим курсам, к этой книге приложен еще эпизодический курс истории физики в иллюстрациях, содержащий технические применения физики.

Такой эпизодический курс является педагогическим экспериментом, уже давшим в других случаях весьма успешные результаты. Он состоит из иллюстраций с довольно подробным объяснительным текстом. У нас не было намерения сделать эти иллюстрации органической частью систематического курса, изложенного в книге. Скорее мы ввели их, чтобы привлечь внимание учащегося, вызвать у него интерес и показать ему целый ряд замечательных фактов и изобретений. Если даже он не поймет их до конца, то, во всяком случае, это побудит его к дальнейшему изучению и заставит работать его мысль. Особенную пользу этот материал принесет ученикам, идущим впереди остального класса и способным больше сделать и больше понять.

Другое преимущество этого «картинного курса» состоит в следующем. Почти каждый преподаватель особенно заинтересован в том или ином техническом применении физики. Часто по местным условиям он желал бы ввести его в свой курс, даже если это и выходит из рамок элементарного курса для средних учеников. Такой преподаватель сможет включить в свой систематический курс все нужные ему из данных иллюстраций.

В книге есть еще один новый педагогический прием: введение через короткие промежутки кратких итогов-резюме, с целью дать учащемуся сжатый обзор того, о чем только что шла речь, и указать важнейшие результаты. Эти чрезвычайно тщательно проработанные резюме сильно упрощают понимание материала и связывают его в одно целое. Другим шагом в этом же направлении было опущение некоторых фактов и задач, которые, как показывает опыт, не вполне доступны среднему учащемуся современной школы.

Мы выражаем свою благодарность буквально тысячам преподавателей, на опыте проверивших не только наши методы, но и самый наш способ изложения.

ГЛАВА I.

ИЗМЕРЕНИЯ.

ОСНОВНЫЕ ЕДИНИЦЫ.

1. Введение. С раннего детства мы почти бессознательно приобретаем целый ряд сведений о том, что нас окружает. Так, например, мы сызмала привыкаем к тому, что камень тонет в воде, а кусок дерева — плавает, что чайник перестает кипеть, если его снять с огня, что после молнии бывает гром, что передача речи по телефону происходит благодаря электрическому току, и т. п.

Изучение физики главным образом должно заставить нас задуматься: к а к и п о ч е м у происходят все эти привычные нам вещи Кроме того, физика знакомит нас с другими явлениями, которые мы могли не заметить и не знать прежде.

Точное знание законов природы приобретается главным образом путем тщательных измерений. Измерять мы можем три рода величин: длину, массу и время. Мы увидим в дальнейшем, что все другие измерения можно свести к этим трем. Поэтому, начиная изучение физики, мы прежде всего познакомимся с единицами длины, массы и времени. С помощью этих единиц мы будем выражать все наши физические знания.

2. Исторические единицы длины. Почти все цивилизованные народы в тот или иной период употребляли меру длины, приблизительно равную по величине длине человеческой ступни. Такова, напр., мера длины — ф у т. Но существовали и другие меры длины. Так, напр., говорят, что английская мера длины я р д была длиной руки одного английского короля, Генриха I. Возможно, что основной мерой длины в Англии служил именно ярд, а фут, появившийся позднее, был определен не по длине человеческой ступни, а как одна треть ярда. [1]

При таком происхождении мер длины понятно, почему в различных странах меры длины были совершенно различные и не соответствовали друг другу.

---

[1] Прежняя русская мера длины а р ш и н была сначала равна по длине $1^1/_2$ локтю (локоть — длина от локтя до конца большого пальца) и лишь позднее приравнена 28 английским дюймам. *Прим. пер.*

3. Соотношение между различными мерами длины. Даже в пределах одной страны происхождение мер длины — самое пестрое. Образцами им служили размеры различных частей человеческого тела и других самых разнообразных предметов. Поэтому и соотношения между различными мерами длины получились самые причудливые и подчас очень неудобные. Напр., в футе — 12 дюймов, в ярде — 3 фута, в миле — 1 760 ярдов и т. д.[1]

4. Соотношение между единицами длины, площади, объема и массы. Еще бо́льшая путаница царила в соотношениях между единицами длины, площади, объема и массы. Так, напр., кубический фут содержит 1 728 куб. дюймов, кварта содержит $57^3/_4$ куб. дюймов, в бочке 31,5 галлона. Казалось бы естественным, чтобы фунт — единица массы — был массой 1 куб. дюйма или 1 куб. фута воды или какого-нибудь другого распространенного вещества. Вместо этого, фунт английский является массой платинового цилиндра совершенно несообразных размеров. Хранится этот цилиндр в Лондоне.

5. Происхождение метрической системы. Во время Великой французской революции Национальное собрание Франции обратило внимание на необычайное неудобство существовавших тогда мер и на большое разнообразие мер в разных местах. Была создана специальная комиссия, которой было поручено выработать более рациональную систему мер. Результатом работы этой комиссии и явилась современная метрическая система. Она была введена во Франции в 1793 г. С тех пор ее постепенно ввели во всех почти цивилизованных странах, за исключением Англии и САСШ. Но даже и в этих странах во всех научных измерениях пользуются метрической системой. Во всяком случае, после мировой войны и Англия и САСШ стоят гораздо ближе к переходу на метрическую систему, чем прежде.[2]

6. Эталон метра. В метрической системе основной мерой д л и н ы считается м е т р (*м*). Размер метра равен расстоянию при 0° С между двумя параллельными черточками, нанесенными на эталоне метра перпендикулярно к его длине. Эталон (или образец) метра приготовлен из сплава иридия (10%) и платины (90%) и имеет форму, показанную на рис. 1. Хранится он в Международном бюро мер и весов в Севре, близ Парижа.[3]

При установлении метра комиссия имела в виду найти такую не изменяющуюся единицу длины, которую можно было бы восстановить в случае потери эталона. Поэтому комиссия предприняла измерение длины Парижского меридиана и затем определила метр, как одну 10-миллионную четверти этого меридиана. Однако, более поздние измерения заставляют нас думать, что комиссия не совсем точно определила длину меридиана. Поэтому мы определяем метр не как какую-то долю земного меридиана, а просто как расстояние между двумя черточками на эталоне метра.

---

[1] То же было и в старых русских мерах. Напр., в сажени — 7 футов, в версте — 500 саж. и т. п. *Прим. пер.*

[2] В СССР метрическая система была введена в 1924 г. *Прим. пер.*

[3] В СССР имеются две копии образцового метра; они хранятся в Ленинграде в Главной палате мер и весов и в Академии наук. *Прим пер.*

В научных измерениях удобнее пользоваться, как основной единицей длины, сантиметром, составляющим сотую часть метра.

7. Метрическая единица емкости. Основная единица емкости называется литром (*л*). Литр — это объем куба, ребро которого равно 0,1 *м*. Литр равен 1 000 кубическим сантиметрам (*куб. см*).

8. Метрическая единица массы. Комиссия, выработавшая метрическую систему, хотела установить соответствие между единицей длины и единицей массы. Поэтому она поручила специальному комитету при Французской академии изготовить платиновый цилиндр, вес которого должен был быть равным весу 1 литра воды при 4° С. (При этой температуре вода имеет наибольшую плотность.) Точно такой же цилиндр, приготовленный из сплава иридия и платины, хранится в настоящее время в Севре вместе с эталоном метра.[1] Этот

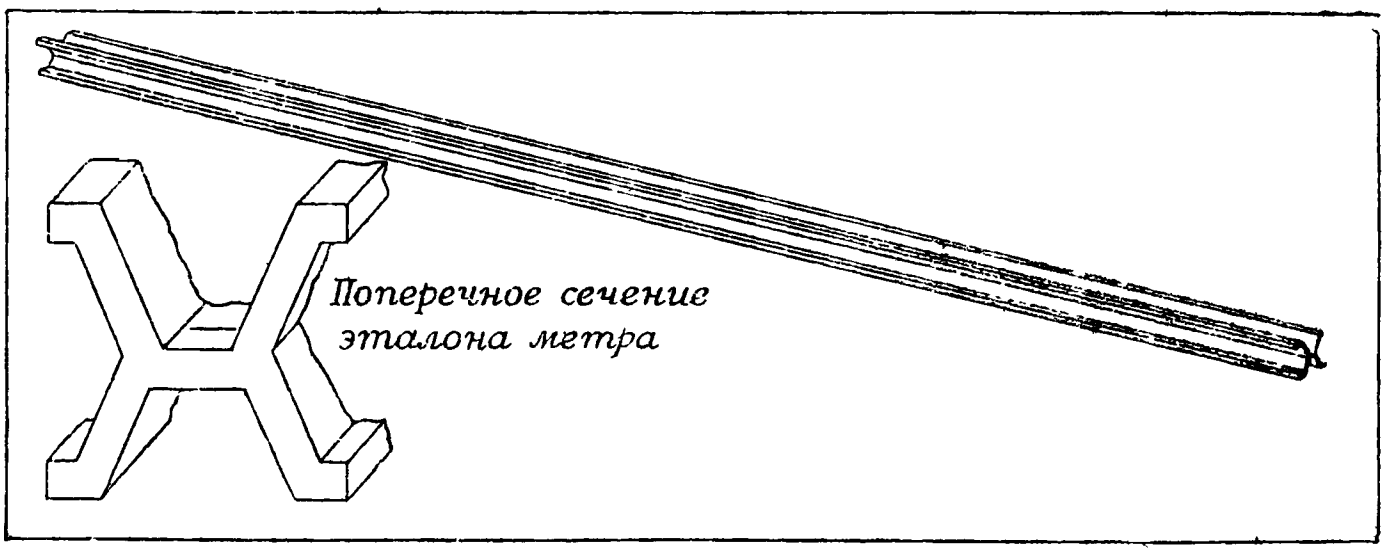


Рис. 1. Эталон метра.

цилиндр является эталоном массы в метрической системе. Называется он эталоном килограмма (*кг*). За основную единицу массы принята одна тысячная массы этого цилиндра. Называется эта единица — граммом (*г*). На практике грамм можно считать равным массе 1 *куб. см* воды.

9. Прочие метрические единицы. Три основных метрических единицы — метр, литр и грамм — имеют целый ряд подразделений. При этом каждая единица длины, объема или массы связана со следующей высшей единицей одним и тем же множителем — десятью. Названия кратных единиц получаются прибавлением греческих приставок *дека* (десять), *гекто* (сто), *кило* (тысяча) и латинских приставок *деци* (десять), *санти* (сто), *милли* (тысяча).

Таким образом:

1 декаметр	= 10 метрам	1 дециметр	= $^1/_{10}$ метра
1 гектометр	= 100 метрам	1 сантиметр	= $^1/_{100}$ метра
1 километр	= 1000 метрам	1 миллиметр	= $^1/_{1000}$ метра

Наиболее распространенными являются следующие меры (в скобках указаны принятые сокращенные обозначения):

метр *(м)*	миллиметр *(мм)*	грамм *(г)*
километр *(км)*	литр *(л)*	килограмм *(кг)*
сантиметр *(см)*	кубический сантиметр *(куб. см)*	миллиграмм *(мг)*

[1] Копии имеются и в СССР. *Прим. пер.*

10. Соотношения между английскими и метрическими мерами.[1] В следующей таблице, приводимой здесь только для справок, даны соотношения между наиболее распространенными английскими и метрическими мерами:

1 дюйм = 2,54 *см*	1 *см* = 0,3937 дюйма
1 фут = 30,48 *см*	1 *м* = 1,094 ярда = 39,37 дюйма.
1 миля = 1,609 *км*	1 *км* = 0,6214 мили

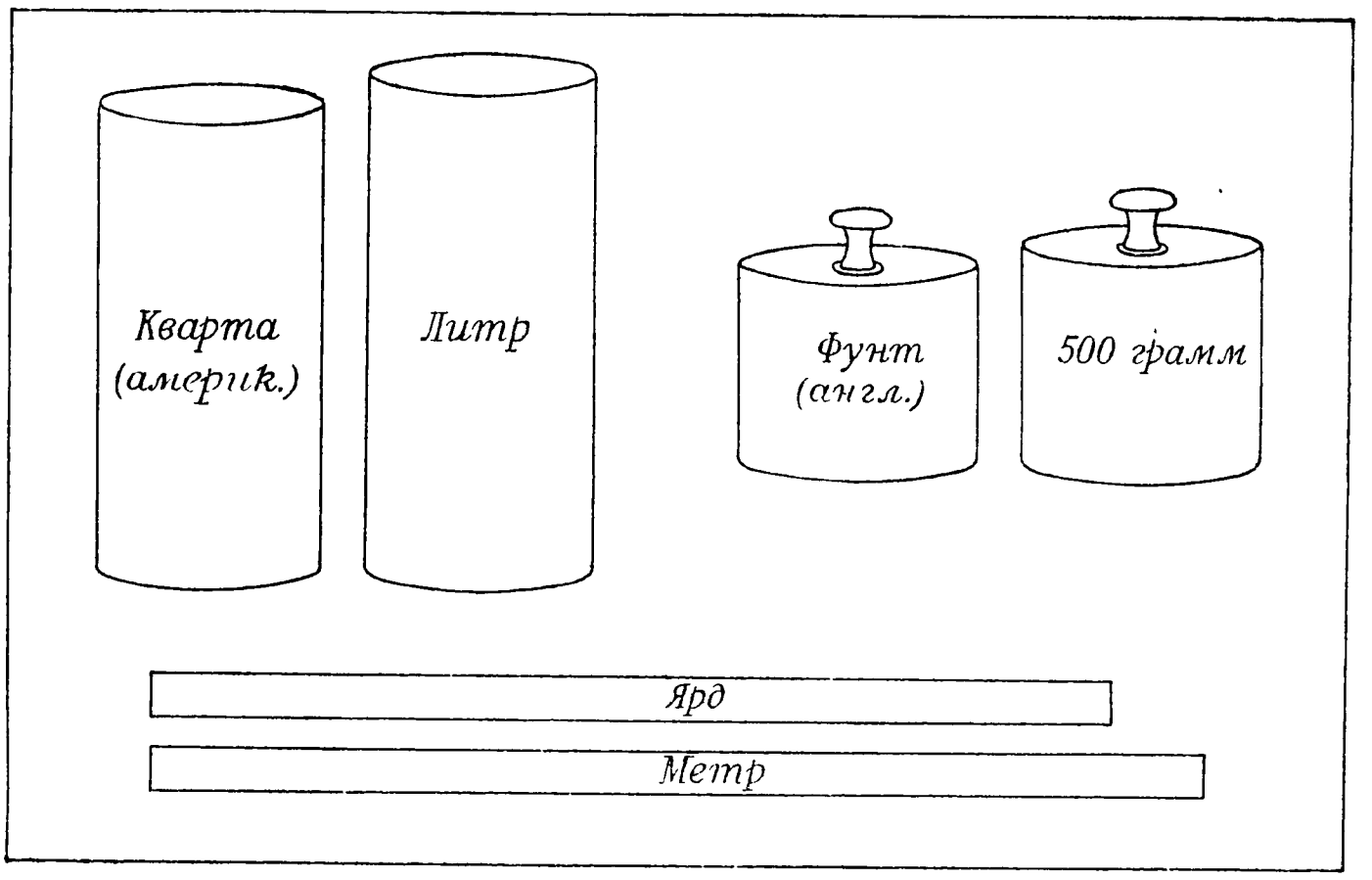


Рис. 2. Сравнительные величины метрических и английских мер.

1 гран = 64,8 *мг*	1 *г* = 15,44 грана
1 фунт английский = 0,4536 *кг*	1 *кг* = 2,204 фунта английских

Запомните соотношения: 1 дюйм = 2,54 *см*, 1 *м* = = 39,37 дюйма, 1 кило *(кг)* = 2,2 фунта, 1 *км* = 0,62 мили.

На рис. 3 показан участок сантиметровой и дюймовой шкалы. На этом же рисунке ясно видно, что 1 дюйм = 2,54 *см*.

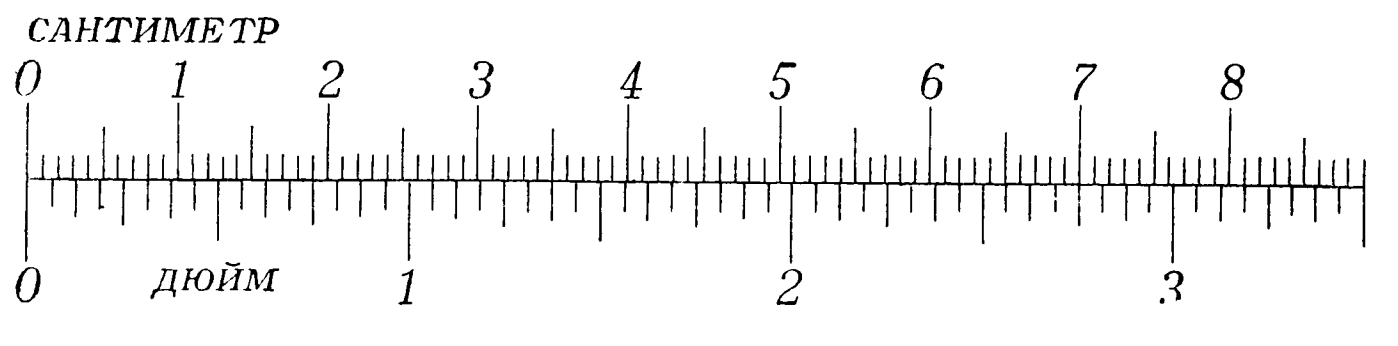


Рис. 3. Сантиметры и дюймы.

11. Основная единица времени. У всех цивилизованных народов за единицу времени принята секунда. Это — $\frac{1}{864000}$ доля средних солнечных суток, т. е. времени, протекающего от одного полудня до другого.

12. Измерение длины. Измерить длину какого-нибудь тела значит сравнить его длину с расстоянием между черточками, нанесенными

---

[1] Соотношение между старыми русскими мерами и метрическими мерами: 1 фунт = 409,5 *г*; 1 *кг* = 2,44 ф.; 1 *км* = $\frac{15}{16}$ версты. *Прим. пер.*

на эталоне метра. Эталон метра хранится в Международном бюро мер и весов. Но копии с него есть во всех странах мира. Эти копии служат каждая в своем государстве основным прототипом длины. По этой длине уже изготовляются обыкновенные «метры», которыми мы пользуемся для измерений длины. «Метры» разделены на 10, 100 и 1000 равных частей. При изготовлении «метров» особенно тщательно следят за точным равенством всех отдельных частей метра.

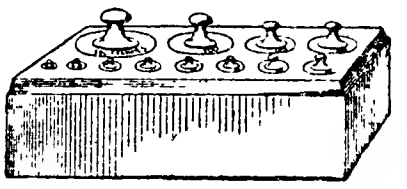


Рис. 4. Набор разновесок.

13. Измерение массы. Измерить массу какого-нибудь тела тоже значит сравнить его массу с массой эталона килограмма. Измерения масс производятся с помощью набора разновесок, т. е. тел, масса которых равна массе эталона килограмма, $^1/_2$ его массы, $^1/_{10}$, $^1/_{100}$, $^1/_{1000}$ и т. д. этой массы (рис. 4).

Имея такой набор разновесок, массу тела определяют следующим образом: тело кладут на чашку весов B (рис. 5) и уравновешивают его, кладя на чашку A дробь, бумагу и т. п. Затем тело снимают и на его место кладут столько разновесок, чтобы стрелка весов опять была на нуле. Масса тела равна сумме масс этих разновесок. Этот строгий и точный метод взвешивания называется методом подстановки.

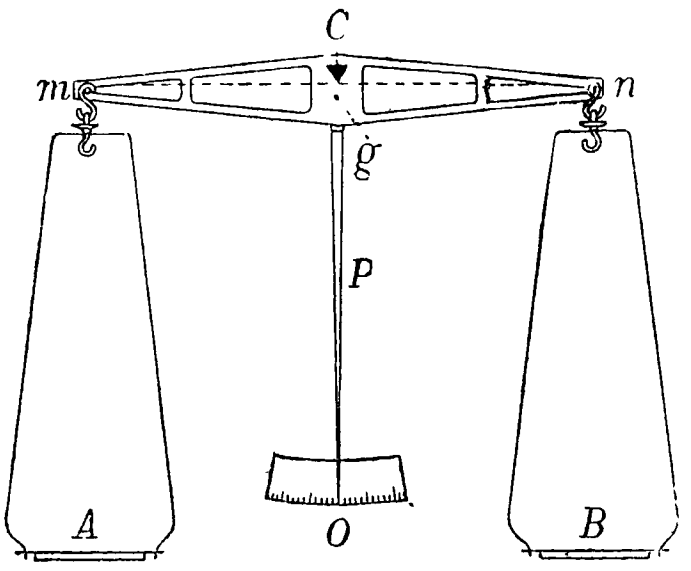


Рис. 5. Простые весы.

Однако, при хорошей конструкции весов взвешивание обычно с достаточной точностью можно производить проще. Взвешиваемое тело кладут на одну чашку весов, а на другую чашку кладут гири до тех пор, пока не наступит равновесие. Это — обычный метод взвешивания. Однако он дает правильный результат только тогда, если призма C находится точно посредине между точками привеса m и n двух чашек. При методе подстановки правильность результата не зависит от положения призмы C.

Принято считать, что масса тела, определенная указанным здесь способом, является мерой содержащегося в теле количества материи.

Резюме. **Существуют три основных измерительных инструмента: 1) метр — для измерения длины; 2) весы — для измерения массы; 3) часы — для измерения времени.**

ПЛОТНОСТЬ.

14. Определение плотности. При взвешивании одинаковых объемов различных веществ, как-то: свинца, дерева, железа и пр., оказывается, что они обладают весьма различной массой. Термином «плотность» обозначают массу или количество материи в единице объема.

В системе сантиметр — грамм — секунда (CGS - система) за единицу объема принят кубический сантиметр, а за единицу массы — грамм. Поэтому говорят, что в этой системе плотность воды равняется 1 *г* на *куб. см*; вспомним, что грамм был определен как масса 1 *куб. см* воды.

Плотность какого-нибудь вещества есть масса 1 *куб. см* этого вещества, выраженная в граммах.

В следующей таблице приведены плотности некоторых наиболее распространенных веществ:

ПЛОТНОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ.

(**в *г* на *куб. см***)

сосна	0,5	медь	8,9
дуб	0,8	никкель	8,9
лед	0,9	серебро	10,5
алюминий	2,58	свинец	11,3
стекло	2,6	золото	19,2
цинк	7,1	вольфрам	19,6
чугун	7,4	платина	21,4
латунь	8,5	осмий	22,5

ПЛОТНОСТЬ ЖИДКИХ ТЕЛ.

(в *г* на *куб. см*)

спирт	0,79	соляная кислота	1,27
керосин	0,82	сероуглерод	1,29
глицерин	1,26	ртуть	13,6

15. Соотношение между массой, объемом и плотностью. Масса тела равна содержащемуся в нем числу граммов, а объем тела равен числу занимаемых им кубических сантиметров. Отсюда ясно, что масса 1 *куб. см* равна всей массе тела, деленной на объем. Так, например, если масса 100 *куб. см* чугуна равна 740 *г*, то плотность чугуна должна быть равна $740 : 100 = 7{,}4$ *г* на *куб. см*. Чтобы выразить эту зависимость в форме уравнения, обозначим массу тела, т. е. содержащееся в нем количество граммов, через M, объем тела, т. е. число занимаемых им кубических сантиметров, через V и плотность его, т. е. число граммов в 1 *куб. см*, — через D.

Тогда имеем

$$D = \frac{M}{V} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Это уравнение выражает в алгебраической форме зависимость между массой, объемом и плотностью.

16. Различие между плотностью и удельным весом. «Удельным весом» называют число, показывающее, во сколько раз вес тела больше веса одинакового объема воды.

Таким образом, если кусок чугуна весит в 7,4 раза больше, чем равный объем воды, удельный вес чугуна равен 7,4. Но, в виду того

что плотность воды в системе CGS равна 1 *г* на *куб. см*, плотность чугуна в этой системе единиц равна 7,4 *г* на куб. сантиметр. Ясно поэтому, что в системе CGS плотность численно равна удельному весу.

Удельный вес один и тот же во всех системах единиц, так как он есть просто число, полученное от деления веса тела на вес равного объема воды. Плотность же, определенная нами как масса единицы объема, различна в различных системах.

Резюме. **Плотность вещества — это масса его в единице объема. Формулой это выражают так:**

$$D = \frac{M}{V}.$$

Удельный вес вещества — это отношение веса какого-нибудь объема данного вещества к весу равного объема воды.

Плотность вещества в системе CGS численно равна его удельному весу.

Вопросы и задачи.

1. Нитяный мяч сжат до $^1/_4$ его первоначального объема. Как это повлияет на его массу? объем? плотность?

2. Назовите три применения свинца, в которых используется его большая плотность, два применения пробки, основанные на ее малой плотности.

3. Литр молока весит 1 032 *г*. Какова его плотность? Его удельный вес?

4. Сколько *куб. см* содержится в куске латуни, весом в 34 *г*? (см. таблицу, стр. 14).

5. Какова масса 1 *л* спирта? (см. табл., стр. 14).

6. Склянка вмещает 2 520 *г* глицерина. Какова емкость склянки в литрах?

7. Деревянное бревно размерами 30 × 20 × 500 *см* имеет массу в 150 *кг*. Какова плотность дерева?

8. Подрядчик взялся перевезти 1 000 мраморных плит в 5 *см* толщиной, 150 *см* шириной и 3 *м* длиной каждая. Удельный вес мрамора — 2,7. Сколько тонн придется ему перевезти? (1 тонна = 1 000 *кг*).

9. Кусок золота весит 772 *г*. Найдите вес куска свинца того же объема.

ГЛАВА II.

ДАВЛЕНИЕ В ЖИДКОСТЯХ.

ДАВЛЕНИЕ НА ЖИДКОСТИ.

17. Определение давления. Все мы знаем, что для подъема килограмма массы мы должны приложить некоторую силу, направленную снизу вверх. Опыт учит нас, что чем больше масса, тем большую силу приходится прилагать к ней. Обычно принято приложенную силу считать численно равной поднятой массе. Это так называемое весовое определение силы.

Усилие, необходимое, чтобы поднять или удержать массу в 1 *г*, называется «силой» в 1 *г*. Так, например, чтобы поднять бронзовую пятикопеечную монету, надо приложить силу в 5 *г*.

Давлением мы называем силу, приходящуюся на единицу площади.

18. Силы, действующие под поверхностью жидкости. Погрузим в жидкость кусок пробки и выпустим его из рук. Его немедленно выбросит на поверхность; он всплывет. Океанский пароход, весь из стали, весящий тысячи тонн, тем не менее тоже поддерживается давлением воды снизу вверх, давлением воды на дно парохода. Водопроводные трубы, находящиеся значительно ниже уровня воды в резервуаре, нередко лопаются от напора воды.

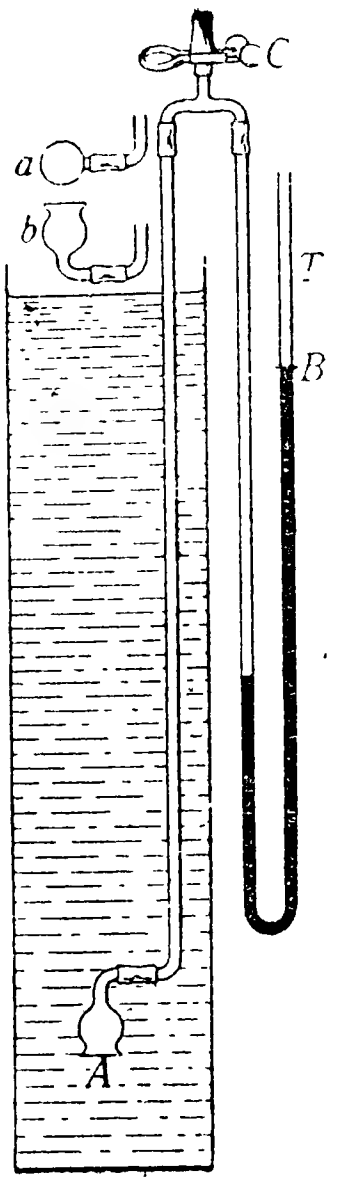


Рис. 6. Манометр для измерения давления жидкости.

Для исследования природы сил, действующих внутри жидкости, мы воспользуемся прибором, изображенным на рис. 6.

На горлышко воронки A натянута резиновая пленка. Нажмем слегка на нее пальцем — столбик подкрашенной воды B в трубке T поднимется. Стоит убрать палец, как столбик B опять опустится. При усилении нажима на пленку столбик поднимется на бо́льшую высоту. Поэтому подъем столбика B может быть принят за меру силы, действующей на пленку A.

Теперь погрузим A в воду; сперва на 10 *см*, затем на 20 *см* и. наконец, на 30 *см* ниже уровня воды (рис. 6). Движение столбика B покажет, что давление снизу вверх увеличивается с увеличением глубины.

Вы сами сможете убедиться с помощью тщательных лабораторных измерений, что сила, действующая в жидкости снизу вверх, прямо пропорциональна глубине.

Опустим A (рис. 6) на некоторую подходящую глубину (напр., на 10 *см*). Отметим положение указателя B тонким резиновым кольцом, отрезанным от резиновой трубки. Потом повернем A так, чтобы пленка была в вертикальном положении (см. *a* на рис. 6). Укрепим A так, чтобы центр пленки был ровно на 10 *см* ниже уровня, т. е. чтобы средняя глубина пленки была та же, что и в предыдущем случае. Положение указателя покажет, что давление на пленку сохранилось прежнее. Наконец, приведем A в положение *b*. Тогда наш прибор будет указывать силу, действующую сверху вниз на глубине 10 *см*. Указатель покажет, что сила эта опять та же самая, что и в двух предшествовавших случаях.

Отсюда мы заключаем, что на данной глубине давление жидкости вверх, вниз и во все стороны одинаково.

19. Величина силы, действующей в жидкости. Когда сосуд, показанный на рис. 8, наполнен жидкостью, давление на дно, очевидно, равно весу столба жидкости, находящегося в сосуде. Пусть F обозначает эту силу в *г*, A — площадь основания сосуда в *кв. см*, h — высоту столба жидкости в *см* и d — плотность жидкости в *г* на *куб. см*.

Тогда имеем

$$F = Ahd \quad . . . . . (1)$$

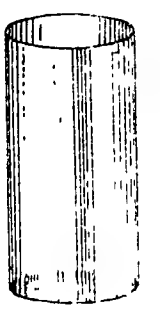


Рис. 7.

Опыт, описанный в предыдущем параграфе, показал, что давление на данную площадь на данной глубине — одинаково во всех направлениях. Поэтому можно высказать следующее общее правило.

Давление жидкости на любую поверхность равно произведению площади этой поверхности на ее среднюю глубину и на плотность жидкости.

При этом важно иметь в виду, что «средней глубиной» h называется вертикальное расстояние от уровня свободной поверхности жидкости до центра рассматриваемой поверхности (рис. 8).

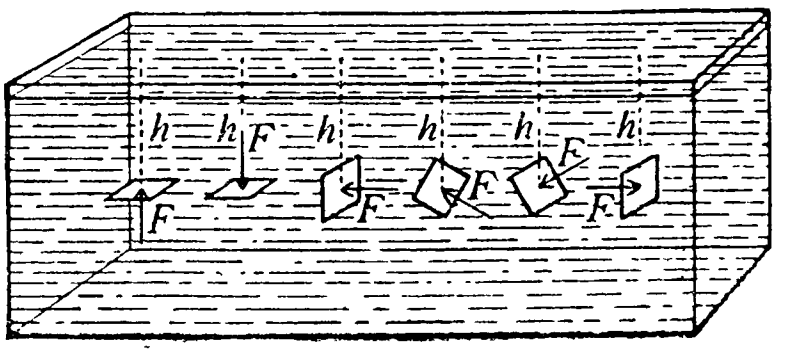


Рис. 8. Средней глубиной h является расстояние от свободной поверхности жидкости до центра площадки.

20. Давление в жидкостях. До сих пор речь шла о всей силе, с которой жидкость действует на всю данную поверхность. Во многих случаях бывает удобнее представить себе поверхность, разделенную на квадратные сантиметры, и рассматривать силу, действующую на 1 *кв. см*. В физике слово «давление» обозначает только такую силу, отнесенную к единице площади. Таким образом, давление является мерой интенсивности силы, действующей на поверхность, и совершенно не зависит от площади поверхности. Так как, согласно § 18, $F = Ahd$ и, по определению, давление p равно силе, действующей на единицу площади, то имеем:

$$p = \frac{F}{A} = hd \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Давление на глубине h *см* под уровнем жидкости, плотность которой d, равно hd *г* на *кв. см*.

21. Уровень жидкости в сообщающихся сосудах. Всем отлично известно, что в полном чайнике уровень воды в самом чайнике и в носике его один и тот же. Точно также, если налить воду в несколько сообщающихся сосудов (напр., изображенных на рис. 9), уровни воды во всех сосудах лежат в одной и той же горизонтальной плоскости.

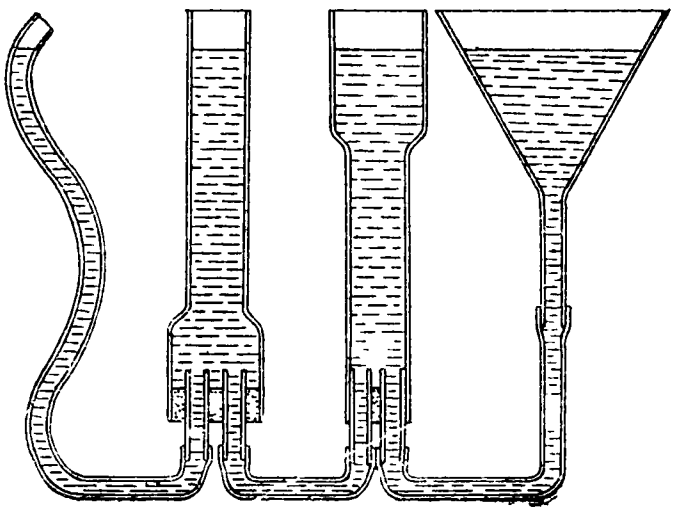


Рис. 9. Уровень воды в сообщающихся сосудах.

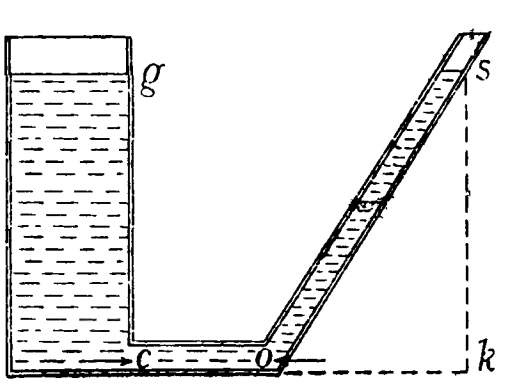


Рис. 10. Почему давление воды в сообщающихся сосудах остается постоянным.

Давление на площадку c (рис. 10), согласно опыту § 17, равно произведению плотности жидкости на глубину площадки cg. Давление на площадку o, направленное в противоположную сторону, должно быть равно давлению на c, так как жидкость не стремится

двигаться ни в том, ни в другом направлении. Следовательно, давление на *o* равно произведению *cg* (= *ks*) на плотность. Другими словами, давление на площадку *o* равно произведению глубины ее на плотность. Если прибавить воды в *s* так, чтобы увеличилась высота *ks*, давление на *o* справа налево сделается больше, чем давление на *c* слева направо. Поэтому получится поток воды налево, пока уровни воды в обоих сосудах не станут опять одинаковыми.

Все это приводит нас к выводу, что давление в жидкости зависит только от глубины под уровнем жидкости и совершенно не зависит от величины или формы сосуда.

Резюме. **Силой, равной 1 *г* мы называем усилие, потребное на поверхности земли, чтобы поднять массу в 1 *г*.**

Давление есть сила, отнесенная к единице площади.

Давление в любой точке внутри жидкости одно и то же по всем направлениям.

Давление *p*, выраженное в *г* на *кв. см*, измеряется произведением расстояния *h* от уровня жидкости, на плотность жидкости *d*, т. е. $p = hd$.

Все части свободной поверхности жидкости в одном сосуде или в нескольких сообщающихся сосудах лежат в одной и той же горизонтальной плоскости.

Вопросы и задачи.

1. Рыба плывет в озере в горизонтальном направлении (рис. 11). Путь ее обозначен пунктиром. Сперва она плывет по глубокому месту, потом по мелкому, и наконец, под нависшей скалой. Какова сила, действующая в воде на рыбу во всех трех случаях? Объясните подробно.

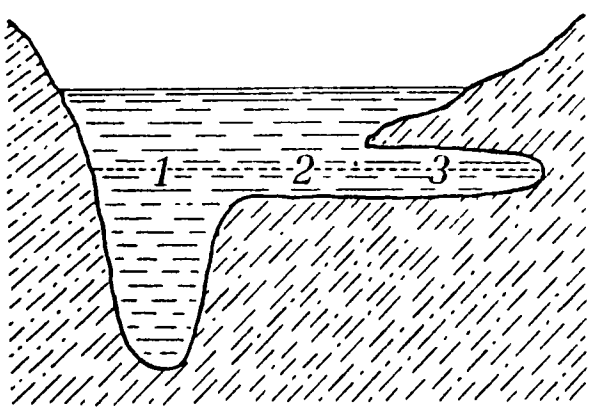


Рис. 11.

2. Человек, весящий 80 *кг*, идет по снегу. Площадь каждой его подошвы — 160 *кв. см*. С какой силой давит на снег его нога в тот момент, когда он всей своей тяжестью опирается на одну ногу? Каково давление его ноги на снег?

Человек пользуется лыжами; площадь каждой лыжи 1 800 *кв. см*. Какое давление оказывает на снег одна лыжа, если человек опирается на нее всей своей тяжестью? С какой силой давит она на снег? Почему на лыжах меньше проваливаешься, чем в сапогах?

3. Какое давление произведет на бумагу острие карандаша, площадью в 1 250 *кв. см*, если ударить карандашом по бумаге с силой в 1 *кг*?

4. Вертикальная труба в 30 *м* высотой наполнена водой. Определите давление воды на дно.

5. В нижней части парохода, на 7 *м* ниже ватерлинии, проделана дыра в 5 *кв. см*. Какую силу надо приложить к доске, закрывающей изнутри эту дыру?

6. Плотность керосина составляет 0,8 плотности воды. Найдите давление, которое производит керосин на дно резервуара, если высота уровня керосина в нем равна 10 *м*.

7. Давление воды в трубах городского водопровода равно 5 *кг* на *кв. см*. Какова высота над городом верхнего уровня воды в вертикальной трубе?

8. Плавающий чан, площадь дна которого равна 4,5 *кв. м*, наполнен водой до высоты в 1,5 *м*. С какой силой действует вода на дно? На одну из сторон?

9. Найдите полную силу, действующую на шлюзные ворота, если ширина их — 20 *м*, а глубина воды — 7 *м*. Нужно ли делать ворота крепче, если они предназначены не для маленького пруда, а для большого озера?

10. U-образная трубка, сечением в 1 *кв. см*, наполнена до известного уровня ртутью (плотность ее 13,6 *г* на *куб. см.*). Затем в одно колено наливают 20 *куб. см* воды. Какова теперь разность уровней — ртути в одном колене и воды в другом?

11. Если площади поверхностей AB на рис. 12(1) и 12(2) одинаковы и вода в обоих сосудах D стоит на одинаковой высоте над AB, то в каком отношении друг к другу находятся силы, действующие на AB сверху вниз в том и другом сосуде?

Постарайтесь проверить правильность вашего ответа на опыте.

Поверхностью AB может служить кусок картона. Наливайте воду в сосуды D, пока картон не оторвется.

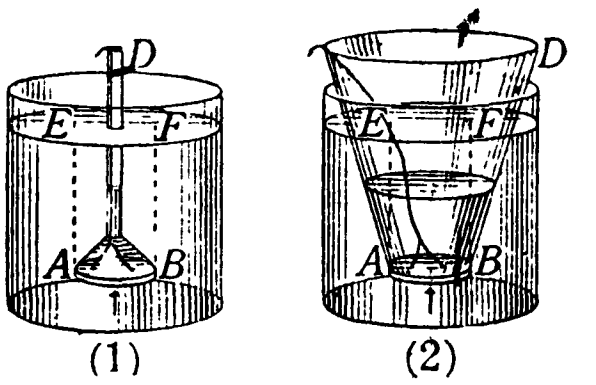
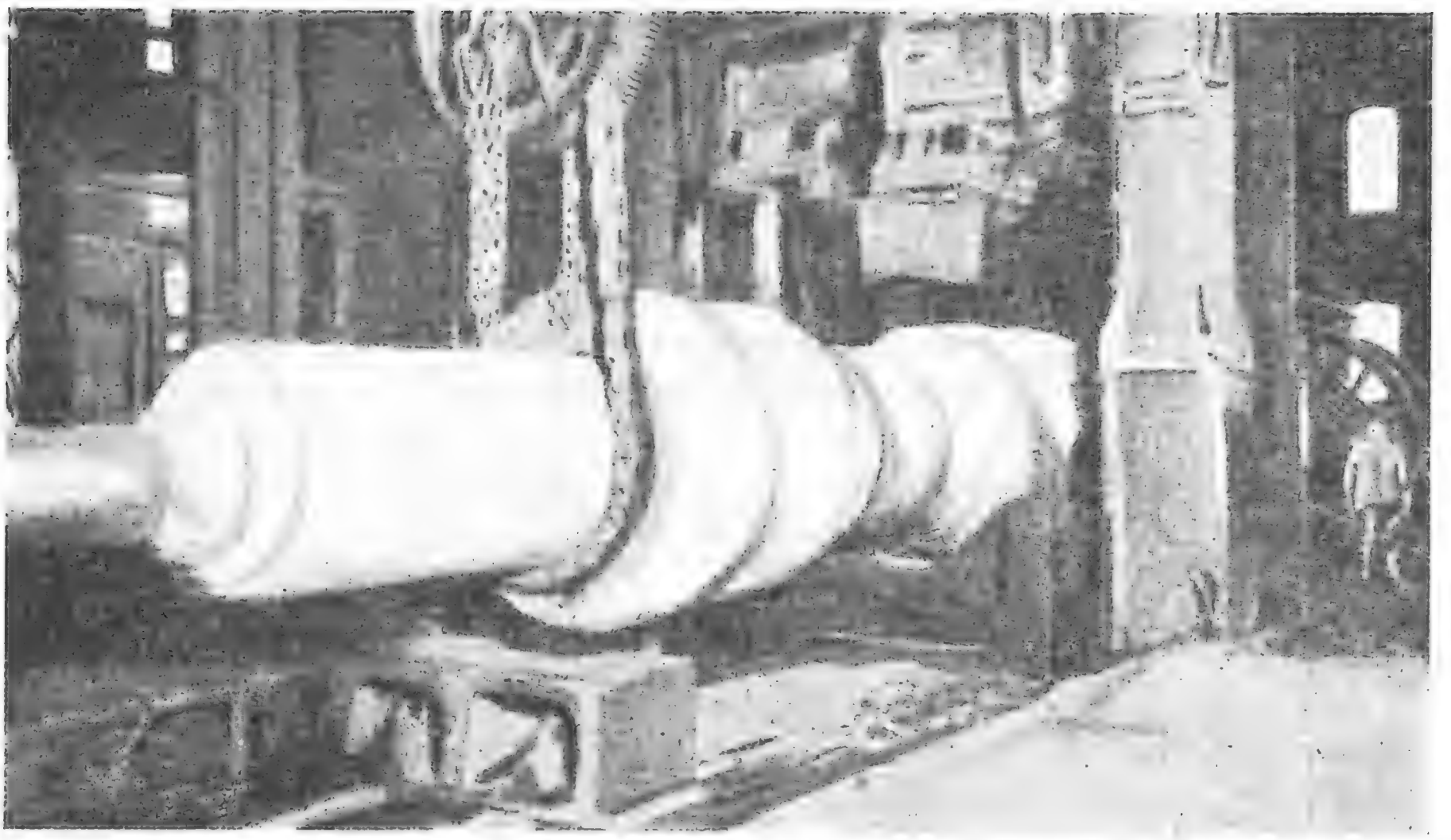


Рис. 12. Иллюстрация гидростатического парадокса.

ЗАКОН ПАСКАЛЯ.

22. **Передача давления жидкостями.** Из того факта, что давление внутри жидкости зависит только от глубины и от плотности жид-



ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРЕСС.

Этот снимок сделан в тот момент, когда пресс производил ковку гигантского полого стального цилиндра с внутренним диаметром, равным 130 *см*, внешним диаметром, равным 155 *см*, и длиною в 13 *м*. Масса докрасна нагретой стали, весом в 100 тонн, была сжата огромной силой пресса вокруг стального пробойника, весящего 87,5 тонн. Пресс действует с силой в 14.000 тонн. Сила передается от двух цилиндров, диаметром каждый в 125 *см*. На каждый цилиндр действует гидравлическое давление, равное 600 *кг* на *кв. см*.

кости, можно сделать очень неожиданный вывод. Впервые его высказал известный французский ученый и философ Паскаль.

Представим себе, что сосуд, изображенный на рис. 13 (1), наполнен водой до уровня ab. Для простоты положим, что пло-

щадь поперечного сечения верхней части сосуда равна 1 *кв. см*. Плотность воды равна 1. Следовательно, на глубине h *см* под уровнем ab вода действует на каждый квадратный сантиметр внутри жидкости с силой h *г*. Прильем теперь в трубку 1 *г* (т. е. 1 *куб. см*) воды. Если прежде некоторая площадка в 1 *кв. см* была на глубине h под уровнем воды в трубке, то теперь эта площадка уже оказывается на глубине $(h + 1)$ *см*. Следовательно, теперь давление воды на эту же площадку равно $(h + 1)$ *г*. Другими словами: прикладывая силу в 1 *г* к 1 *кв. см* поверхности ab, мы увеличиваем на 1 *г* силу, с которой вода действует на каждый квадратный сантиметр внутри сосуда. Ясно, что совершенно безразлично, произведено ли давление на ab водой или поршнем с грузом, как на рис. 12 (2), или любым другим способом. Таким образом, мы приходим к выводу Паскаля:

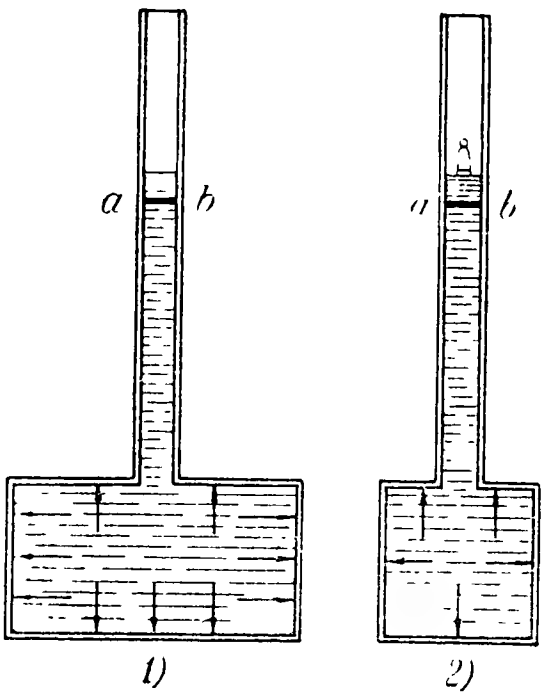


Рис. 13. Доказательство закона Паскаля.

Давление, приложенное к любой части поверхности жидкости, заключенной в закрытый со всех сторон сосуд, целиком передается этой жидкостью каждой кв. единице площади стенок сосуда.

23. Увеличение силы при передаче давления жидкостью. Сам Паскаль указал, что на основании вышеприведенного вывода можно превращать очень маленькую силу в сколь угодно большую.

Так, например, пусть площадь цилиндра ab (рис. 14) равна 1 *кв. см*, а цилиндра AB — 1 000 *кв. см;* если приложить к ab силу в 1 *кг*, жидкость передаст каждому квадратному сантиметру поверхности AB давление в 1 *кг*. Таким образом, на весь поршень AB будет действовать сила в 1 000 *кг*, полученная от приложенной к ab силы в 1 *кг*. Вот подлинные слова Паскаля: «Сосуд, наполненный водой, — это новый принцип в механике и новая машина для увеличения силы до желаемых размеров. С его помощью один человек может сдвинуть любую тяжесть».

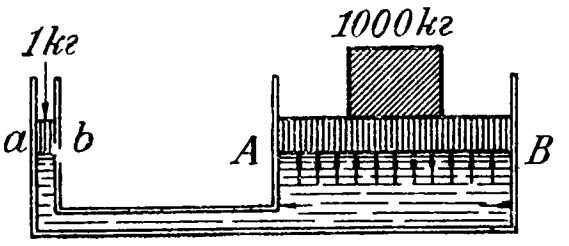


Рис. 14. Увеличение силы при передаче давления.

24. Гидравлический пресс. Опытное подтверждение вывода, сделанного в предыдущем параграфе, мы имеем в гидравлическом прессе. В настоящее время гидравлическим прессом широко пользуются при прессовке бумаги, пряжи и пр., при продавливании отверстий в листах железа, при испытании прочности железных балок, при выжимании масла из зерен, при штамповке, при чеканке металла и т. д.

В стальной промышленности употребляют гидравлические прессы большой мощности, с успехом заменяющие гигантские паровые молоты (см. стр. 19). С их помощью достигают давлений в 14 000 *m* и выше. В настоящее время большую часть как холодной, так и горячей стали не бьют молотом, а сжимают прессом. При подъеме малого поршня p (рис. 15) вода из цистерны C постуает через клапан v в поршневую камеру. При опускании поршня p клаппн v закрывается, клапан же v^1 открывается. Тогда да-

вление, произведенное на поршень p, передается по трубке K в большой резервуар и действует там на большой цилиндр P.

Сила, действующая на P, во столько раз больше силы, приложенной к p, во сколько раз площадь P больше площади p.

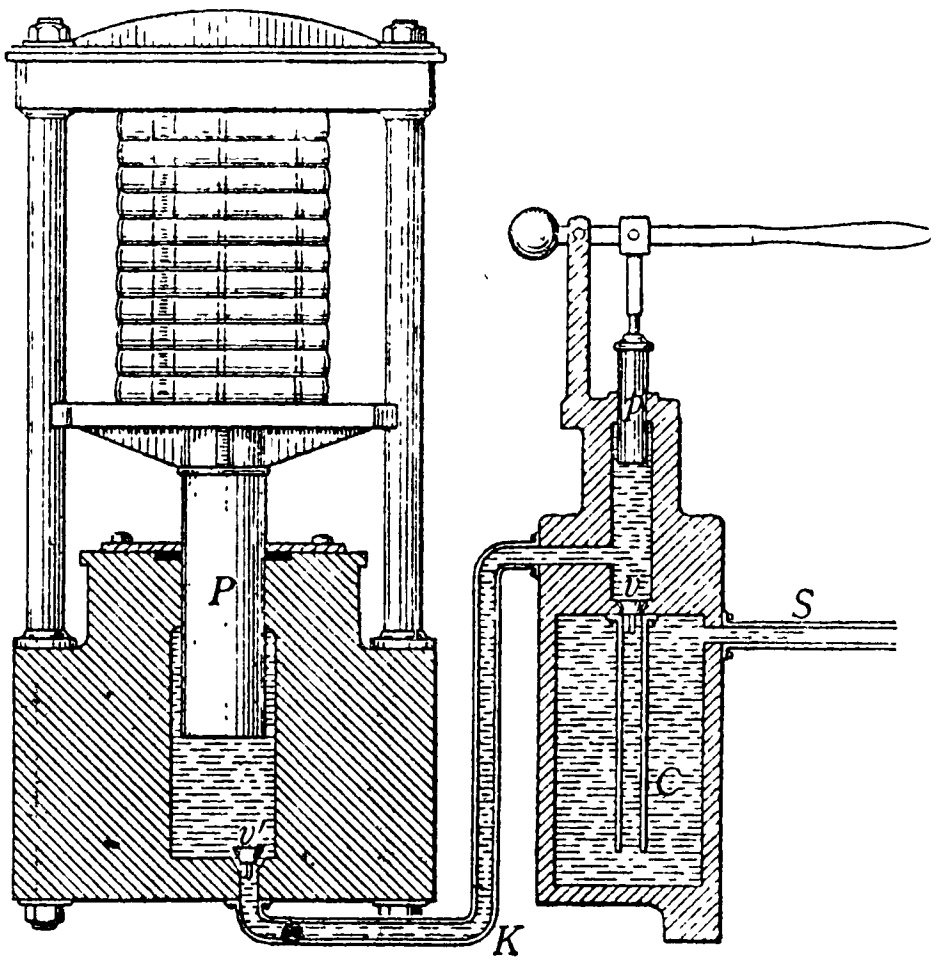


Рис. 15. Схема гидравлического пресса.

25. Произведение силы на перемещение не увеличилось. Заметим, что в то время как сила, действующая на AB (рис. 14), в 1000 раз больше силы, действующей на ab, путь, пройденный поршнем AB вверх за некоторый промежуток времени, составляет только $^1/_{1000}$ пути, пройденного поршнем ab вниз. Чтобы поршень ab опустился на 1 *см*, из малого цилиндра в большой должен перейти 1 *куб. см* воды. От этого уровень воды в большом цилиндре повысится только на $^1/_{1000}$ *см*. Таким образом, мы видим, что произведение силы на перемещение одинаково на обоих концах машины. В дальнейшем мы убедимся, что это важное заключение относится ко всем машинам любого типа.

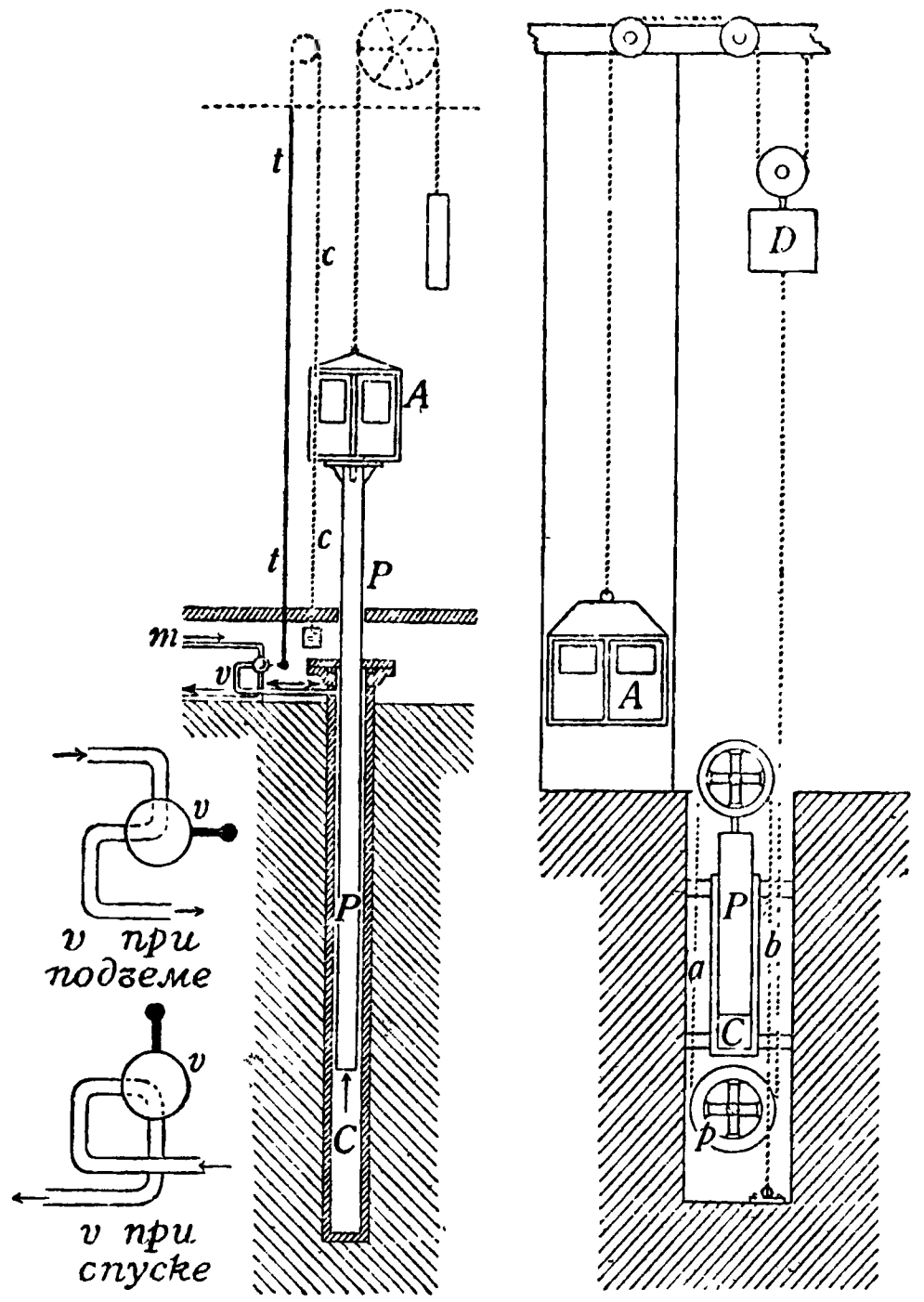
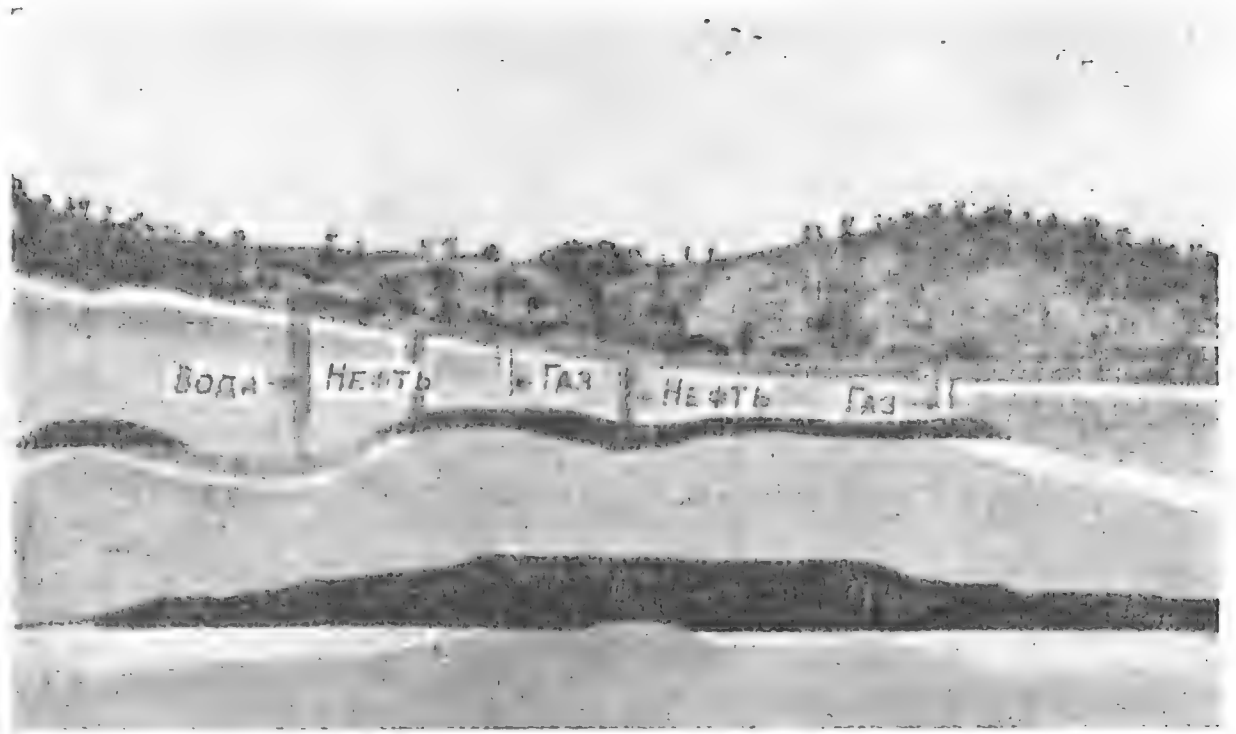


Рис. 16—17. Схема гидравлического элеватора.

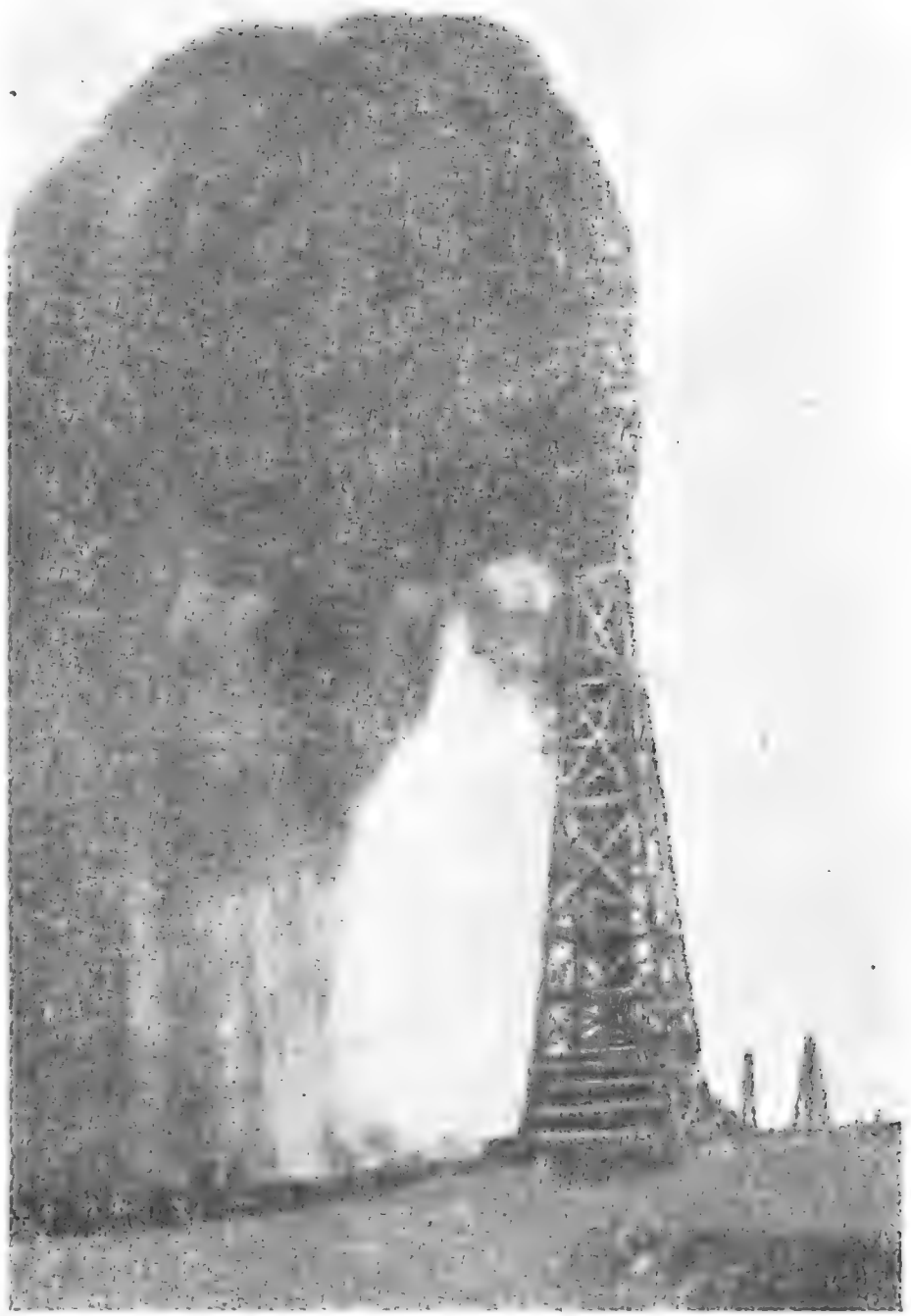
26. Гидравлический элеватор. Другой очень распространенной установкой, где имеет место передача давления жидкостью, является гидравлический элеватор. Простейший вид такого элеватора показан на рис. 16. Клетка A укреплена на длинном поршне P, движущемся вдоль цилиндрического жолоба C. Длина жолоба равна высоте, на которую должна подниматься клетка A. Вода поступает в жолоб или прямо из городского водопровода по трубке m, или, если таким образом не достигается требуемое давление, из специального резервуара, находящегося в верхнем этаже здания. С помощью веревки cc можно открывать и закрывать

клапан V. Когда V открывается, и открывается проход из m в C, — элеватор поднимается. Когда клапан V поворачивается так, что вода из C вытекает в водосточную трубу, — элеватор опускается.



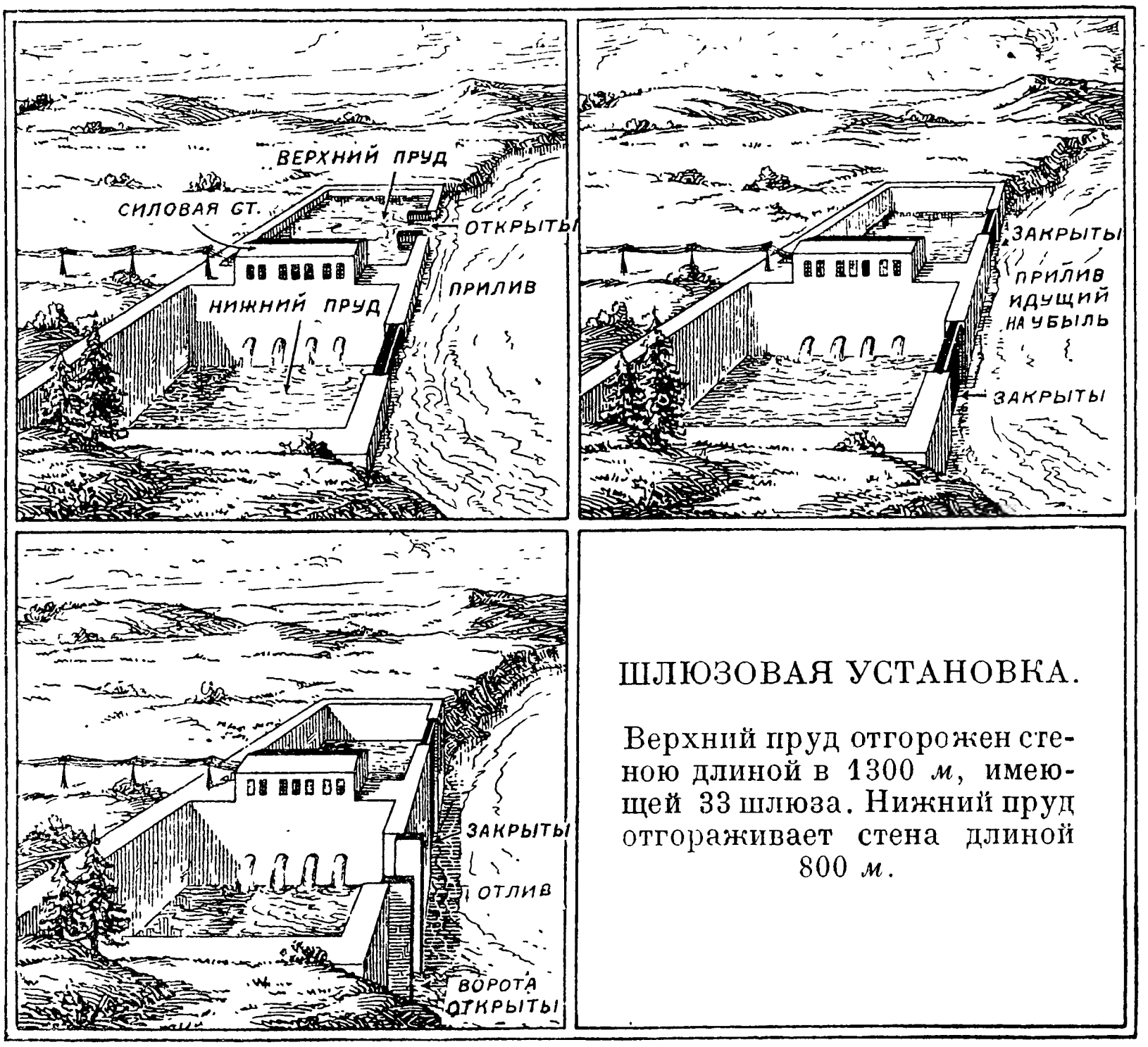
МЕСТОРОЖДЕНИЕ НЕФТИ.

Газ и нефть находятся в пористых породах, лежащих под непористыми слоями, напр., в известняке или песчанике, покрытых сланцами. Часто под газом и нефтью находится вода. Давление газа иногда достигает 100 *кг* на *кв. см*. Поэтому часто, когда бурение доходит до слоя воды или нефти, вода и нефть вырываются кверху, выбрасывая высоко в воздух буровые инструменты и краны. Когда давление газа становится слишком низким, чтобы выбросить нефть из скважины, приходится ее оттуда выкачивать. Иногда этот газ отводят по трубопроводам, достигающим многих километров в длину, к месту обработки стали, где его ежедневно сжигают в количестве миллионов куб. метров. Мы имеем здесь в природе иллюстрацию закона Паскаля в большом масштабе.



Когда требуется большая скорость, движение поршня передается клетке посредством системы блоков, как показано на рис. 17. C таким приспособлением перемещение поршня P на $^1/_2$ *м* вверх вызывает перемещение груза D, уравновешивающего A, на 1 *м* вниз. Это ясно из рис. 17, когда поршень поднимается на $^1/_2$ *м*, через неподвижный блок p должно перекинуться

столько каната, чтобы каждый из кусков a и b удлинился на $^1/_2$ *м*. Точно также при опускании D на 1 *м* A поднимается на 2 *м*. Следовательно, клетка движется в четыре раза скорее и в четыре раза дальше поршня. Такого рода элеваторы находятся в Эйфелевой башне в Париже. Они проходят путь



ШЛЮЗОВАЯ УСТАНОВКА.

Верхний пруд отгорожен стеною длиной в 1300 *м*, имеющей 33 шлюза. Нижний пруд отгораживает стена длиной 800 *м*.

в 140 *м* и способны поднять 50 человек на высоту 130 *м* в минуту. Во многих элеваторах цилиндр C и поршень P не находятся в жолобе, а лежат в горизонтальной плоскости. (Большинство современных элеваторов не гидравлические, а электрические.)

27. Городское водоснабжение. На рис. 18 изображено устройство, посредством которого можно снабжать города водой из отдаленного источника.

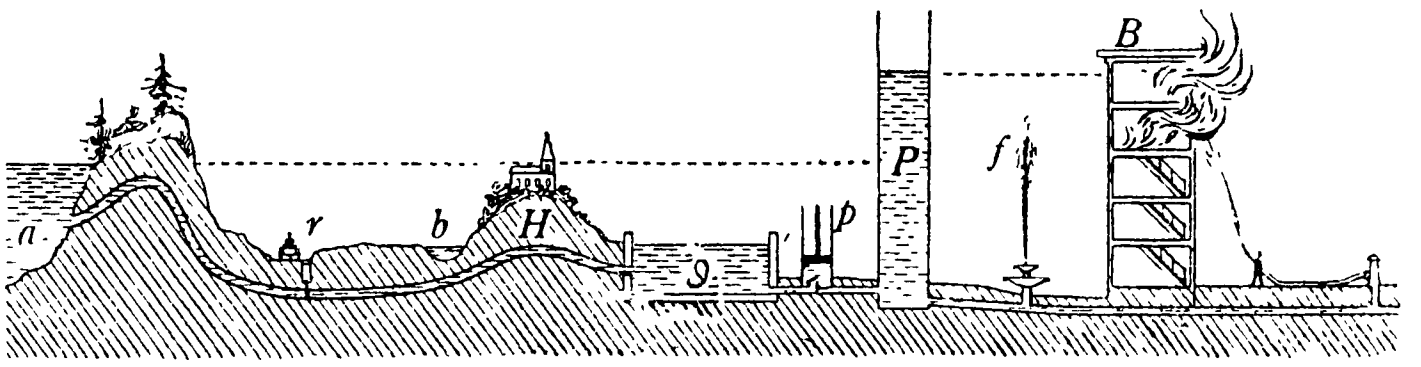


Рис. 18. Схема водоснабжения города из озера.

Акведук выходит из озера a, проходит под дорогою r, под ключом b, под горой H и выходит в резервуар e. Оттуда вода насосом p на-

качивается в водонапорную башню P, откуда и распределяется по домам города. Если бы вся система находилась в статическом состоянии, уровень воды в e должен был бы быть точно таким же, как и в a, а уровень в трубах здания B был бы такой же, как в трубе P. Но вода течет, и трение воды о стенки труб заставляет уровень e быть несколько ниже уровня a, а уровень в B — ниже, чем в P. Трение о стенки труб и о воздух заставляет фонтан f подняться гораздо ниже идеального предела, показанного на рисунке. Когда чистят резервуар e, а также при ремонте и несчастных случаях, поступление воды из озера a может быть полностью или частично прекращено с помощью гигантских клапанов или шлюзов в r.

Резюме. **Закон Паскаля. Давление, приложенное в любом месте к налитой в сосуд жидкости, целиком передается каждому *кв. см.* поверхности сосуда.**

Правило гидравлического пресса. Сила, действующая на большой поршень, во столько раз больше силы, действующей на малый поршень, во сколько площадь большого поршня больше площади малого поршня. Это выражается следующей формулой

$$\frac{F}{f} = \frac{A}{a} = \frac{D^2}{d^2}$$

Вопросы и задачи.

1. Сосуд с водой почти всегда лопается, если сильно ударить по его пробке. Пусть внутренняя поверхность сосуда равна 120 *кв. см*, а площадь поперечного сечения пробки равна 6 *кв. см*. Какая сила действует на внутреннюю поверхность сосуда, если ударить о пробку с силой в 5 *кг*?

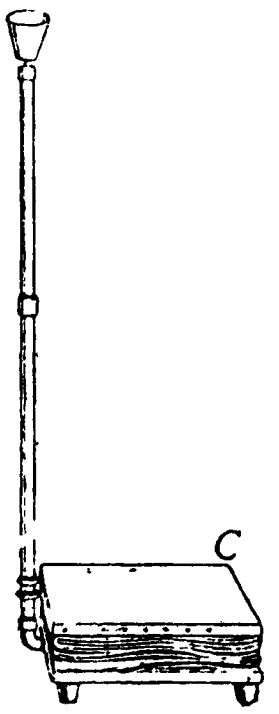


Рис. 19. Гидростатические меха.

2. Рис. 19 изображает инструмент, обычно называемый гидростатическими мехами. Если площадь основания C равна 50 *кв. см* и трубка заполнена водой до высоты в 1,5 *м* над верхним краем C, то какую тяжесть (в *кг*) могут поднять меха?

3. Площади поперечных сечений поршней гидравлического пресса — 20 *кв. см* и 400 *кв. см*. Какой вес может выдержать большой поршень, если на малый положено 35 *кг*?

4. Диаметры поршней гидравлического пресса 5 *см* и 50 *см*. Какая сила подействовала бы на большой поршень, если бы к малому была приложена сила в 25 *кг*?

5. Давление воды в городском водопроводе равно 7 *кг* на *кв. см*. Диаметр поршня гидравлического элеватора типа, указанного на рис. 16, равен 25 *см*. Если бы можно было пренебречь трением, какой груз мог бы поднять элеватор? Если 30% идеальной мощности теряется на трение, то какой груз может поднять элеватор?

6. Откуда ваш город получает воду? Какое давление поддерживается в трубах?

ЗАКОН АРХИМЕДА.

28. Подъемная сила жидкости. Предшествовавшие опыты показали, что на всякое тело, погруженное в жидкость, действует сила снизу вверх. Когда в жидкости находится пробка, кусок дерева, лодка или вообще любое плавающее тело, то, очевидно, раз тело находится

в равновесии, подъемная сила жидкости уравновешивается весом тела. Даже если тело не плавает, оно все же теряет в жидкости некоторую часть своего естественного веса. Это известно из повседневного опыта. Каждый отлично знает, что в воде легче поднять камень, чем в воздухе, и что человек в ванне может поддерживать всю свою тяжесть, едва касаясь дна ванны кончиками пальцев. Именно это последнее наблюдение впервые натолкнуло древнегреческого философа Архимеда (287 — 212 до нашей эры) на открытие точного закона о подъемном действии жидкости на погруженное в ней тело.

Сиракузский тиран Гиерон велел изготовить себе золотую корону. Он заподозрил мастера в том, что тот обманул его: сделал корону не из чистого золота, а примешал туда серебра. Тиран приказал Архимеду расследовать, верно ли его подозрение. Вначале для старого философа было загадкой, как произвести расследование, не разрушая короны. Принимая свою ежедневную ванну и заметив потерю в весе своего собственного тела, он внезапно понял, что всякое тело, погруженное в жидкость, претерпевает кажущуюся потерю в весе, равную весу вытесненной жидкости.

Говорят, что Архимед вдруг выскочил из ванны и побежал по улицам Сиракуз с криком: «Эврика! Эврика!» (в переводе значит: Нашел! Нашел!)

29. Теоретическое доказательство принципа Архимеда. Архимед, по всей вероятности, дошел до своего заключения без всякого логического процесса, а скорее интуитивно, как это часто бывает у гениальных ученых. Однако легко дать и логическое доказательство его принципа. Подъемная сила F, действующая на дно параллелепипеда B (рис. 20), равна весу столба жидкости C. На верхний край пареллелепипеда B действует сверху вниз сила F^1, равная весу столба жидкости C^1. Столб жидкости C больше столба C^1. Очевидно, подъемная сила F превосходит силу F^1, действующую вниз. И избыток этот как раз равен $C - C^1$, т. е. весу жидкости в объеме, занимаемом параллелепипедом.

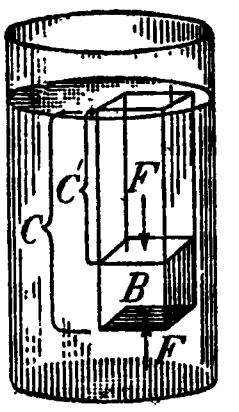


Рис. 20. Тело, погруженное в жидкость, испытывает давление снизу вверх, равное весу вытесненной жидкости.

Принцип Архимеда можно, следовательно, формулировать так: подъемная сила жидкости в точности равна весу вытесненной жидкости.

Рассуждение это остается в силе независимо от рода жидкости, в которую погружено тело, и от глубины тела под поверхностью жидкости.

Если тело весит больше вытесненной им жидкости, оно пойдет ко дну, ибо книзу его тянет собственный вес, а вверх толкает меньший вес вытесненной им жидкости. Если же тело весит меньше вытесненной им жидкости, то подъемная сила, равная весу вытесненной жидкости, больше собственного веса тела, и, следовательно, тело поднимается на поверхность. Когда тело достигнет поверхности жидкости, сила, действовавшая на него сверху вниз и равная весу

столба жидкости C, станет равной нулю. Тело будет продолжать подъем, если только подъемная сила жидкости не уравновесится весом тела. Но подъемная сила жидкости всегда равна весу вытесненной жидкости, т. е. весу столба жидкости *mbcn* (рис. 21). Следовательно:

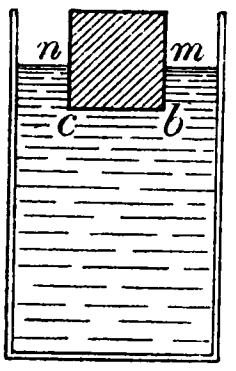
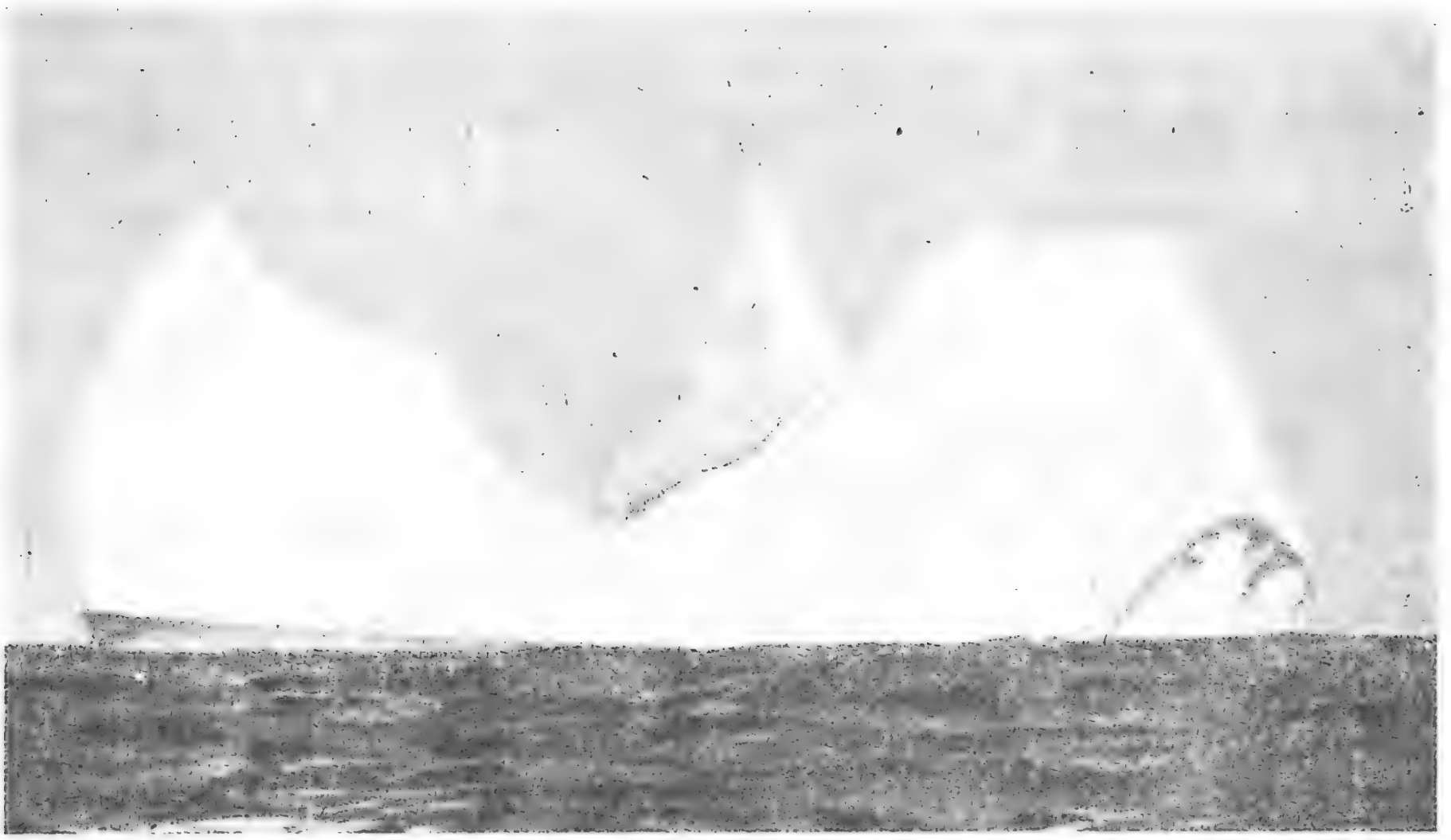


Рис. 21. На плавающее тело действует сила, направленная снизу вверх и равная весу вытесненной жидкости.

плавающее тело вытесняет количество жидкости, весящее столько же, сколько весит само тело.

Собственно говоря, это утверждение заключается в самом принципе Архимеда: ведь когда тело плавает, оно теряет весь свой вес.

Чтобы проверить это, поместим отливной сосуд на чашку весов, наполним его водой и тщательно уравновесим его. Затем опустим в сосуд кусок дерева, так чтобы он плавал в нем. Когда вода перестанет переливаться через край, чашки весов опять окажутся в равновесии. Какой вывод делаете вы из этого?



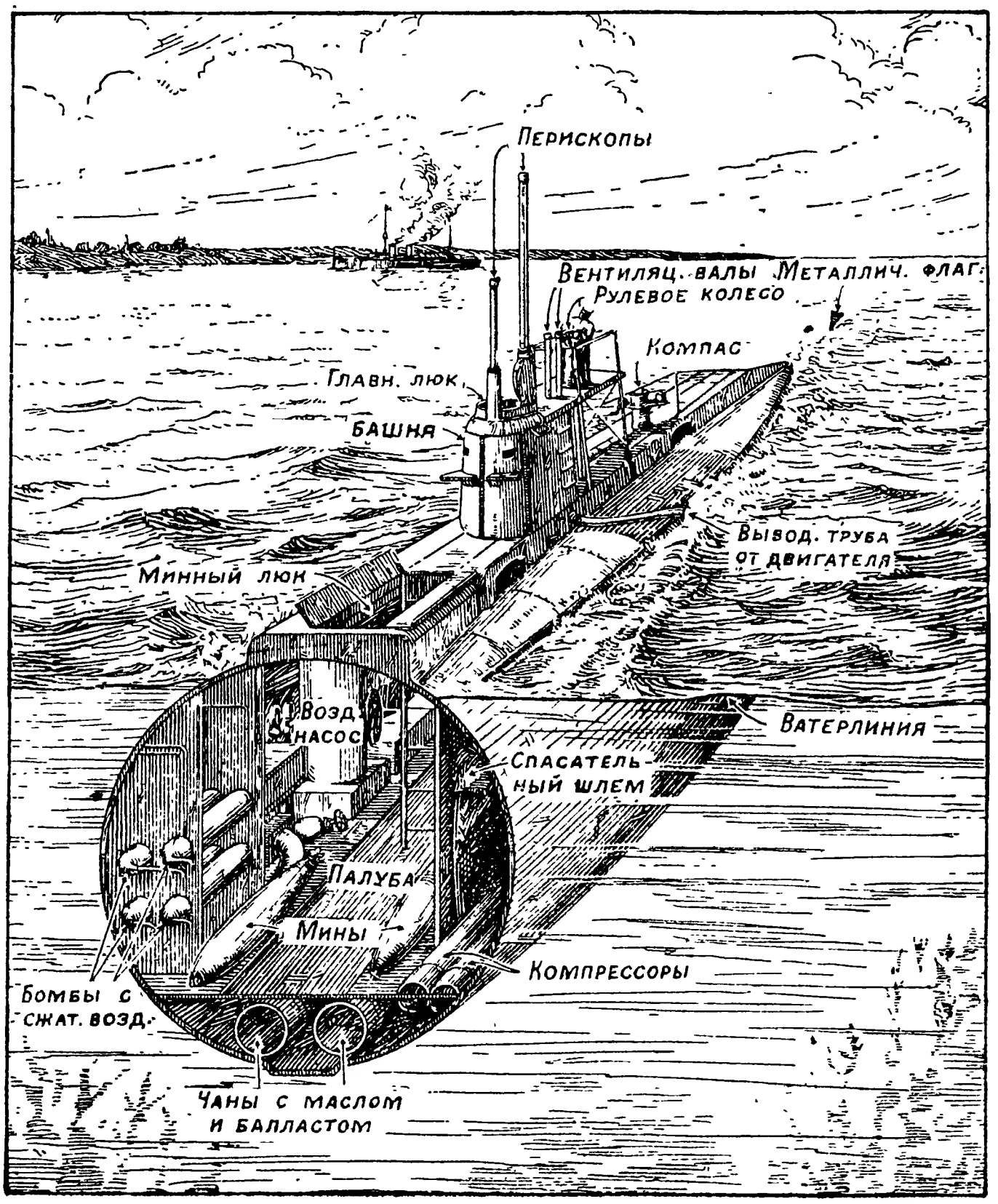
АЙСБЕРГ.

Этот гигантский айсберг образовался вследствие сползания в море громадной ледяной шапки, покрывающей Гренландию. Ледниковый лед несколько пористый, и плотность его меньше, чем у твердого льда. Примерно около $^6/_7$ всей массы айсберга находится под уровнем моря, так что иногда нижний край айсберга находится на 500 *м* под водой. Некоторые айсберги так велики, что занимают площадь в 2,5 *кв. км* при 160 *м* глубины.

30. Удельный вес твердых тел, которые тяжелее воды. По определению, удельный вес какого-нибудь тела есть отношение веса тела к весу одинакового объема воды (§ 16). Тело, погруженное в жид-

кость, вытесняет объем воды, равный объему тела, какой бы неправильной формы тело ни было. Поэтому

$$\text{удельный вес тела} = \frac{\text{вес тела}}{\text{вес вытесненной воды}}$$



ПОДВОДНАЯ ЛОДКА.

Подводная лодка — одно из новейших морских изобретений — основана на применении закона Архимеда, — одного из самых старых законов физики. Чтобы опуститься под воду, подводной лодке достаточно забрать в свои балластные резервуары столько воды, чтобы вес всей лодки вместе с балластом был приблизительно равен весу вытесняемой ею воды. Тогда лодка оказывается почти погруженной в воду. При этих условиях можно с помощью руля глубины заставить лодку опуститься совсем под воду, или, наоборот, подняться из-под воды на поверхность для пользования перископом. Вся эта операция требует нескольких секунд. Для того, чтобы поднять подводную лодку на поверхность (для зарядки батарей или для других целей), из балластных резервуаров выгоняют воду с помощью сжатого воздуха. На поверхности подводные лодки движутся с помощью дизелей, под водою — с помощью аккумуляторных батарей. и электрических моторов.

Применяя принцип Архимеда, имеем:

$$\text{удельный вес тела} = \frac{\text{вес тела}}{\text{подъемная сила (потеря в весе при погружении в воду)}}$$

31. Удельный вес твердых тел, которые легче воды. Если тело слишком легкое, чтобы тонуть в воде, мы все же можем измерить вес равного объема воды, заставив тело погрузиться в жидкость с помощью грузила. Положим, например, что на правой чашке весов лежит гиря w_1 когда тело находится в воздухе, а груз под водой, и гиря w_2 когда и тело и груз под водой. Тогда, очевидно, сила давления воды на тело (без груза) равна $w_1 - w_2$ (это — потеря тела в весе при погружении в воду); поэтому разность $w_1 - w_2$ равна весу вытесненной воды.

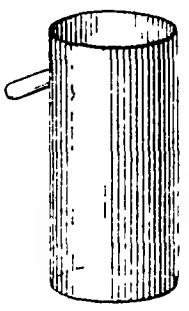


Рис. 22. Отливной сосуд.

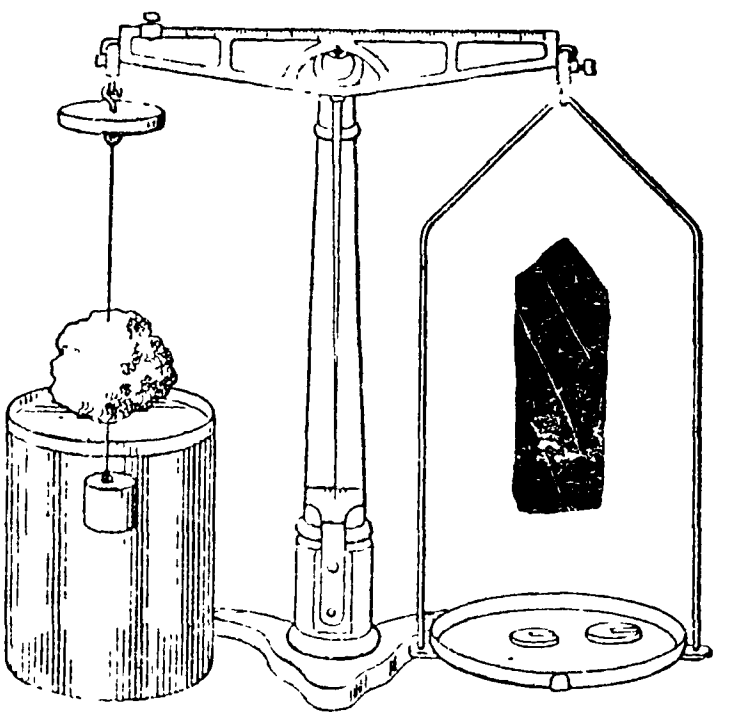


Рис. 23. Определение удельного веса твердого тела, более легкого чем вода.

32. Определение удельного веса жидкостей с помощью ареометра. Ареометр был изобретен .греками, примерно, шестнадцать веков тому назад. Ареометр, обычно употребляемый для испытания удельного веса спирта, молока, кислот, сахарных растворов и т. д., имеет вид, указанный на рис. 24. Ножка ареометра проградуирована опытным путем, так что по ней можно непосредственно найти удельный вес любой жидкости. Ареометр основан на следующем принципе: всякое плавающее тело погружается в жидкость до тех пор, пока вес вытесненной им жидкости не сделается равным его собственному весу. Если ножка очень тонкая, чувствительность ареометра может быть очень велика. Почему?

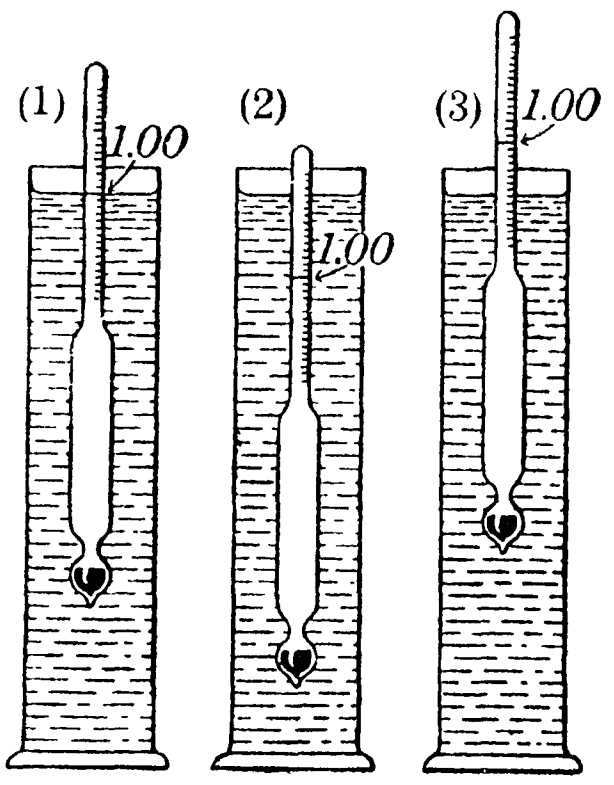


Рис. 24. Ареометр постоянного веса.

33. Определение удельного веса жидкостей по методу «потери в весе». Взвесим какое-нибудь подходящее твердое тело сперва в воздухе, затем в воде и, наконец, в жидкости, удельный вес которой неизвестен. Согласно принципу Архимеда, потеря тела в весе в жидкости равна весу вытесненной жидкости, и потеря веса в воде равна весу вытесненной воды. Деля потерю веса в жидкости на потерю в воде, мы делим вес данного объема жидкости на вес того же объема воды.

Поэтому:

Чтобы найти удельный вес жидкости, достаточно разделить потерю в весе некоторого

твердого тела в этой жидкости на потерю в весе того же тела в воде.

Резюме. **Принцип Архимеда. Подъемная сила жидкости равна весу вытесненной жидкости.**

$$\text{Удельный вес твердого тела, которое тяжелее воды} = \frac{\text{вес тела}}{\text{потеря в весе в воде}}.$$

$$\text{Удельный вес твердого тела, которое легче воды (по методу груза)} = \frac{\text{вес тела}}{(\text{вес тела в воздухе} + \text{вес груза в воде}) - \text{вес обоих в воде}}.$$

$$\text{Удельный вес жидкости (по способу «потери в весе»)} = \frac{\text{потеря в весе твердого тела в жидкости}}{\text{потеря в весе того же тела в воде}}.$$

Вопросы и задачи.

1. Объясните: 1) почему кусок пробки, погруженный под воду, поднимается; 2) почему кусок железа или камень идет ко дну.

2. От чего зависит кажущаяся потеря в весе тела, погруженного в жидкость, — от объема тела или от его веса? Объясните.

3. Кусок свинца, подвешенный к одной чашке весов, уравновешивает кусок алюминия, подвешенный ко второй чашке. Поместим теперь оба куска с сосуды с водой. Какой металл покажется теперь тяжелее? Объясните подробно.

4. Уравновесим сосуд с водой вместе с предметом, более тяжелым, чем вода, как показано на рис. 25 (положение *a*). Затем поместим предмет в сосуд с водой (положение *b*). Останутся ли весы в равновесии? Предскажите результат, а затем проделайте опыт.

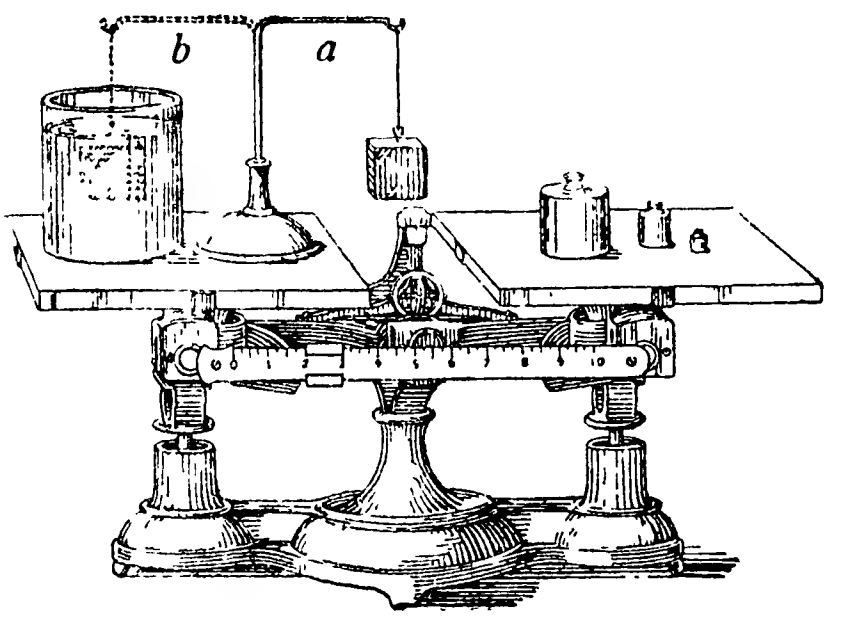


Рис. 25. Доказательство весомости воздуха.

5. Кирпич, погруженный в воду на 30 *см*, потерял в весе 0,5 *кг*. Сколько он потерял бы на глубине в 1 *м*?

6. Сталь в три раза плотнее алюминия. В воду погружены равные объемы того и другого. Как относятся между собой их кажущиеся потери в весе?

7. Мальчик, находящийся в воде в равновесии, весит 60 *кг*. Каков его объем?

8. Пустая бутылка из-под молока весит 680 *г*; наполненная водой, она весит 1918 *г*; наполненная молоком, она весит 1955 *г*. Найдите удельный вес этого сорта молока.

9. Градуированный стеклянный цилиндр содержит 190 *куб. см* воды. В него опустили яйцо, весящее 40 *г*. Оно идет ко дну, а уровень поднимается до отметки 225 *куб. см*. Найдите плотность яйца.

10. Тело теряет в весе в воде — 25 *г*, в масле — 23 *г*, в спирте — 20 *г*. Найдите удельный вес масла и спирта.

11. Платиновый шар весит в воздухе 330 *г*, в воде 315 *г*, а в серной кислоте 303 *г*. Найдите объем шара и удельный вес платины и кислоты.

12. *Куб. см* камня весит в воде 1,6 *г*. Найдите удельный вес камня.

13. Кусок песчаника, удельный вес которого 2,6, весит в воде 480 *г*. Найдите вес его в воздухе.

14. Железный куб, ребро которого равно 10 *см*, весит 7 500 *г*. Сколько он весит в спирту, плотность коего 0,82 *г* на *куб. см*?

15. Кузов современных военных судов почти весь стальной; стенки его состоят из стальных листов толщиной от 15 до 45 *см*. Объясните, как эти суда могут плавать?

16. Поднимется ли лодка, или сядет глубже в воду при переходе из реки в океан?

17. Где находятся бо́льшие числа на ножке аре́ометра — ближе к кончику или ближе к началу? Объясните, почему?

18. Барка, площадью в 10 × 5 *м*, опустилась на 10 *см*, когда на борт был взят слон. Сколько весил слон?

19. Какая часть плавающего бруска дерева будет над водой, если удельный вес дерева 0,5? 0,6? 0,9? Укажите в общей форме, какая часть объема плавающего тела находится под водой.

20. Деревянный брусок вышиной в 25 *см* опускается в воду на 15 *см*. Найдите удельный вес дерева.

21. Каков удельный вес жидкости, в которой тело с удельным весом 6,8 плавает так, что половина его объема погружена в жидкость?

22. Кусок парафина весит в воздухе 178 *г*, добавочный груз весит в воде 30 *г*. Оба вместе весят 8 *г* в воде. Найдите удельный вес парафина.

23. Если в задаче 22 срезать половину парафина, вес оставшейся половины с грузом равен в воде не 8 *г*, а 19. Докажите, что это верно, и объясните кажущееся увеличение в весе.

24. Предположим, что корона Гиэрона весила 1 070 *г* и потеряла в воде 60 *г*. Найдите (1), сколько *куб. см* золота заключалось в короне, (2) сколько *куб. см* серебра, (3) сколько *г* золота, (4) сколько *г* серебра. (См. таблицу плотностей.)

ГЛАВА III.

ДАВЛЕНИЕ В ВОЗДУХЕ.

БАРОМЕТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ.

34. Вес воздуха. Обыкновенно воздух нами почти не ощущается Кажется, что воздух не имеет веса и что он не представляет сопротивления телам, проходящим сквозь него. Однако, если взвесить стеклянный шар (как показано на рис. 26) и потом наполнить его с помощью велосипедного насоса сжатым воздухом, шар окажется при повторном взвешивании тяжелее, чем прежде. Если же соединить шар с воздушным насосом и выкачать из него воздух, шар станет легче.

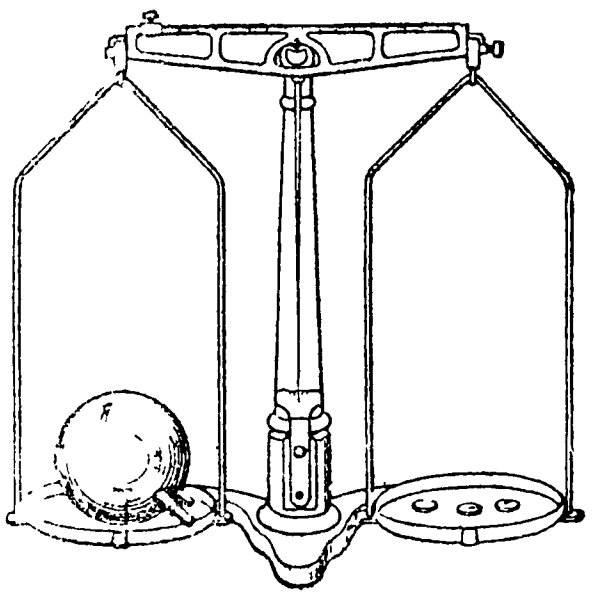
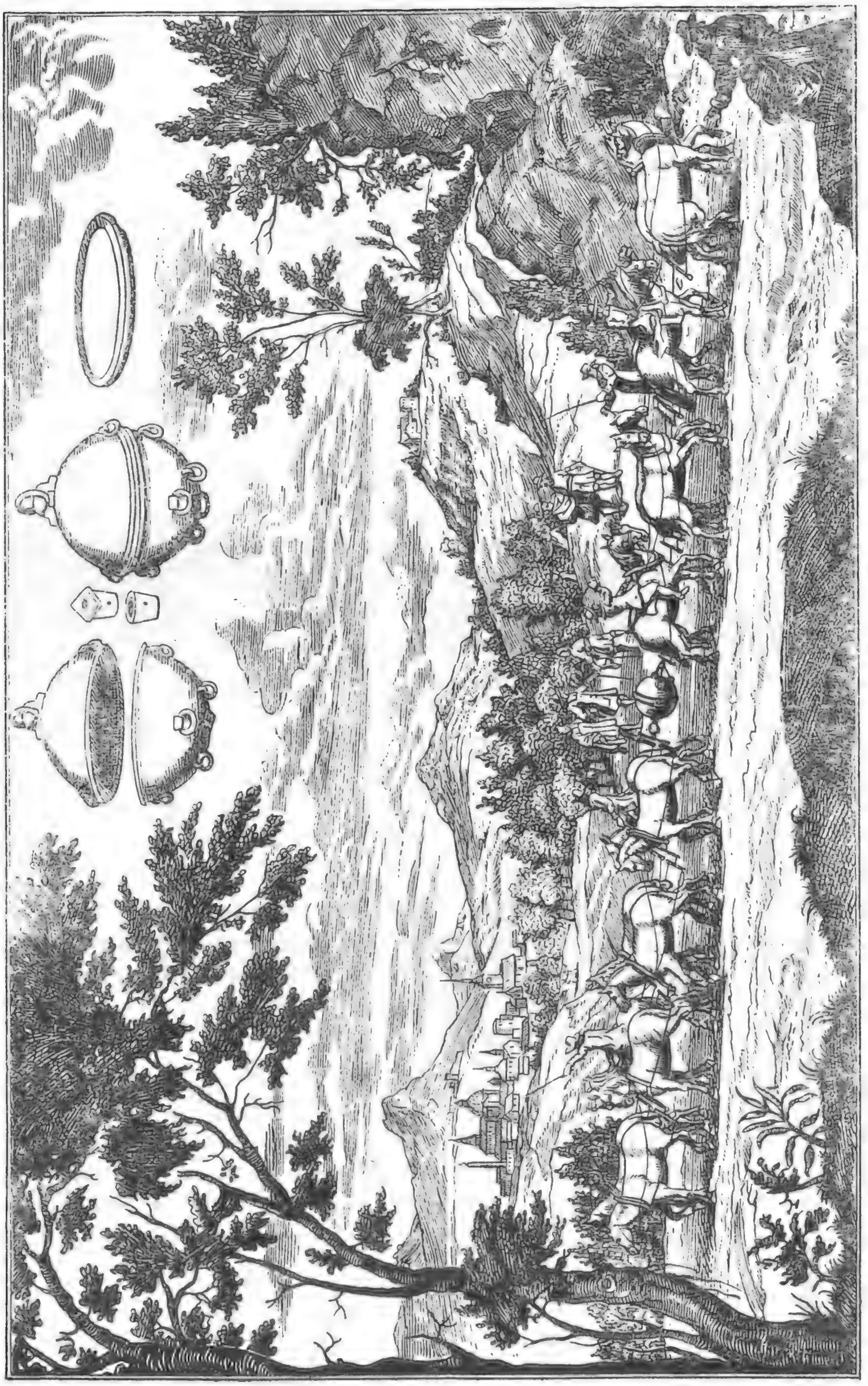


Рис. 26. Доказательство весомости воздуха.

Отсюда ясно, что воздух может быть помещен в сосуд, изъят из него, что можно его взвешивать и, вообще, обращаться с ним точно так же, как с жидкостями и твердыми телами.

Мы привыкли говорить про легкие тела, что они легки «как воздух», «воздушны». Однако тщательные измерения показали, что всего только 1 *куб. м* воздуха уже весит примерно 1,3 *кг*. Таким образом, в одной большой комнате содержится воздуха больше, чем может поднять нормальный человек; например, в комнате размерами 20 *м* × 10 *м* × 5 *м* воздух весит больше тонны. Плотность воздуха при 0° и при нормальном давлении атмосферы равна 0,001293 *г* на *куб. см*. Таким образом, вес некоторого объема воздуха составляет $\frac{1}{773}$ веса такого же объема воды.

35. Доказательство того, что воздух производит давление. Из того, что воздух имеет вес, можно заключить, что он, так же как жид-



МАГДЕБУРГСКИЕ ПОЛУШАРИЯ.

Эта картинка находится на обложке книги, в которой описаны опыты Отто фон-Герике. Шестнадцать лошадей стараются разделить Магдебургские полушария, между которыми находится разреженное пространство. Эти полушария по сей день хранятся в Берлинском музее. Их внутренний диаметр равен 55 *см.*

кости, действует с некоторой силой на всякое помещенное в нем тело. Следующий опыт докажет правильность такого заключения.

Натянем над горлышком стеклянного сосуда резиновую пленку, как на рис. 27. По мере выкачивания воздуха через дно сосуда, пленка будет

вдавливаться все более и более и, наконец, лопнет вследствие давления воздуха сверху.

Другой опыт. Наполним часть жестяной банки водой и вскипятим воду. Поднимающийся пар вытеснит воздух из банки. Во время кипения воды плотно закроем банку пробкой. Затем поместим банку в ушат или в корыто и обольем ее холодной водой. Пар внутри банки сгустится, и давлением наружного воздуха банка будет сплющена (см. рис. 28).

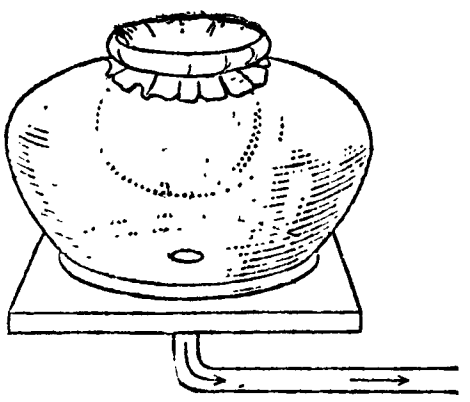


Рис. 27. Резиновая пленка, растянутая действием веса воздуха.

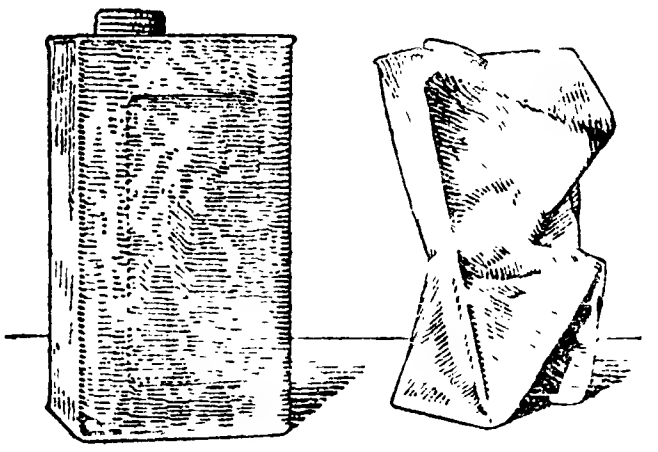


Рис. 28. Сосуд, раздавленный атмосферным давлением.

36. Причина подъема жидкостей в «пустых» трубках. Если нижний конец длинной трубки опустить в воду и выкачивать воздух через верхний конец, вода поднимется по трубке. Правильность этого утверждения мы проверяем каждый раз, когда пьем лимонад через соломинку. Древние греки и римляне объясняли это тем, что «природа боится пустоты», и это объяснение все еще было общепринятым даже во времена Галилея. Но в 1640 году, когда близ Флоренции пытались насосом поднять воду из колодца на большую высоту, то, к удивлению водопроводчиков оказалось, что никакими имеющимися насосами нельзя было поднять из этого колодца воду выше, чем на 10,33 *м* над уровнем воды в колодце. Когда обратились к старому Галилею за объяснением, тот ответил, что, очевидно, «боязнь пустоты у природы не простирается дальше 10,33 *м*». Галилей, по всей вероятности, подозревал, что эффект, вызывавший удивление, был обусловлен давлением воздуха, так как к тому времени он уже доказал весомость воздуха. Более того, он сразу же взялся за постановку другого опыта, чтобы испытать, как он говорил, «мощность пустоты». Он умер в 1642 году, не доведя опыта до конца, но завещал своему ученику Торичелли продолжить эти исследования.

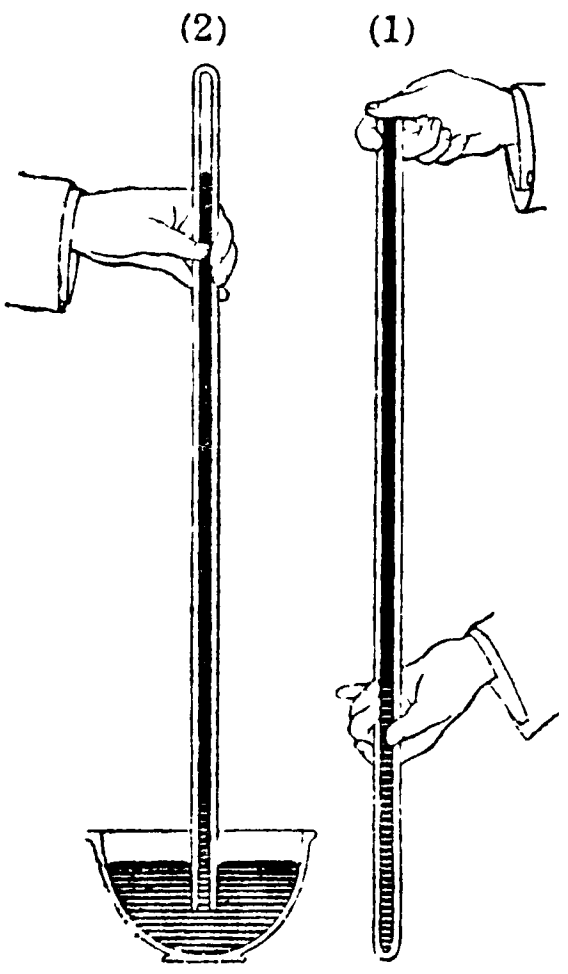


Рис. 29. Опыт Торичелли.

37. Опыт Торичелли. Торичелли рассуждал следующим образом: если вода поднялась на 10,33 *м*, то ртуть, примерно, в 13 раз более тяжелая, должна подняться на высоту в 13 раз меньшую. Для проверки этого положения он произвел в 1643 г. следующий знаменитый опыт.

Взяв трубку, запаянную с одного конца и целиком заполненную ртутью, как на рис. 29, Торичелли затк ул ее с другого конца пальцем и опустил этот конец трубки в сосуд со ртутью. Когда он отнял палец, ртуть опустилась в трубке, несмотря на то, что над ней осталась пустота. И верхний уровень ртути действительно остановился на высоте, составляющей около $^1/_{13}$ от 10,33 *м* (т. е. около 76 *см*) над уровнем ртути в сосуде.

На основании этого опыта Торичелли заключил, что подъем жидкости в пустых трубках происходит вследствие давления атмосферы на поверхность жидкости, а вовсе не из-за какой-то таинственной притягательной силы, присущей пустоте, в которую многие верят даже и в настоящее время.

38. Дальнейшие решающие опыты. Неоспоримым аргументом в пользу такого заключения было бы падение уровня ртути в трубке при удалении воздуха с поверхности ртути в сосуде.

Сделаем следующий опыт. Сосуд с ртутью и трубку поместим на тарелку воздушного насоса, как на рис. 30, пропустив трубку через крепко пригнанную резиновую пробку *A* в колоколе насоса. Как только насос начнет действовать, ртуть в трубке действительно опустится. При дальнейшей откачке ртуть все ближе и ближе подойдет к уровню ртути в сосуде. Обычно, однако, ртуть не достигает этого уровня, так как обыкновенный воздушный насос не может создать такого разрежения, какое господствует в верхнем конце трубки. Если теперь пустить в колокол воздух, ртуть опять поднимется в трубке до прежнего уровня.

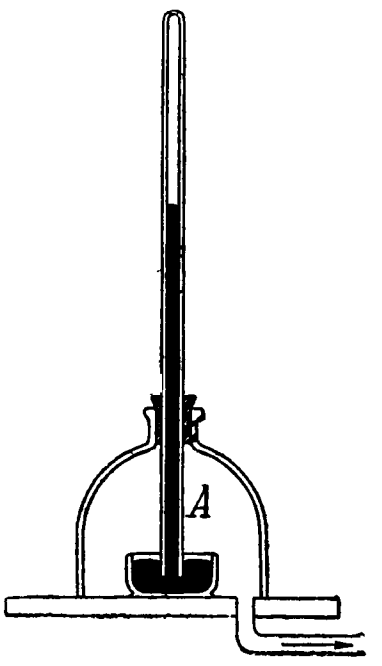


Рис. 30. Когда уменьшается давление на поверхность ртути, барометр опускается.

39. Величина атмосферного давления. Из опыта Торичелли можно совершенно точно вычислить величину атмосферного давления, так как оно уравновешивает столб ртути определенной высоты. Давления во всех точках, лежащих на одном уровне *ac*, равны (рис. 31). Поэтому давление на поверхность ртути *C* равно давлению столба ртути на поверхность *a*. Это последнее равно *hd*, где *d* — плотность ртути, а *h* — расстояние до поверхности ртути *b*. На уровне моря средняя высота столба *ab* оказалась равной 76 *см*. Плотность ртути равна 13,6 *г* на *куб. см*. Следовательно, давление в трубке на уровне *a* равно 76 × 13,6 *г*, т. е. 1 033,6 *г* на *кв. см*. В виду этого атмосферное давление на поверхность ртути *c* равно 1 033,6 *г*, или, приблизительно, 1 *кг* на 1 *кв. см*.

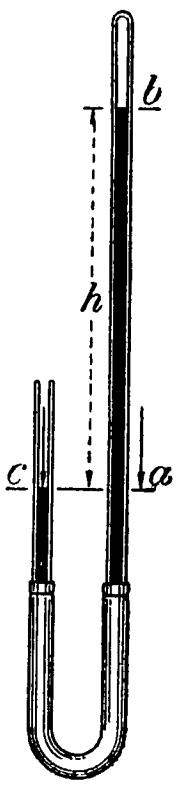
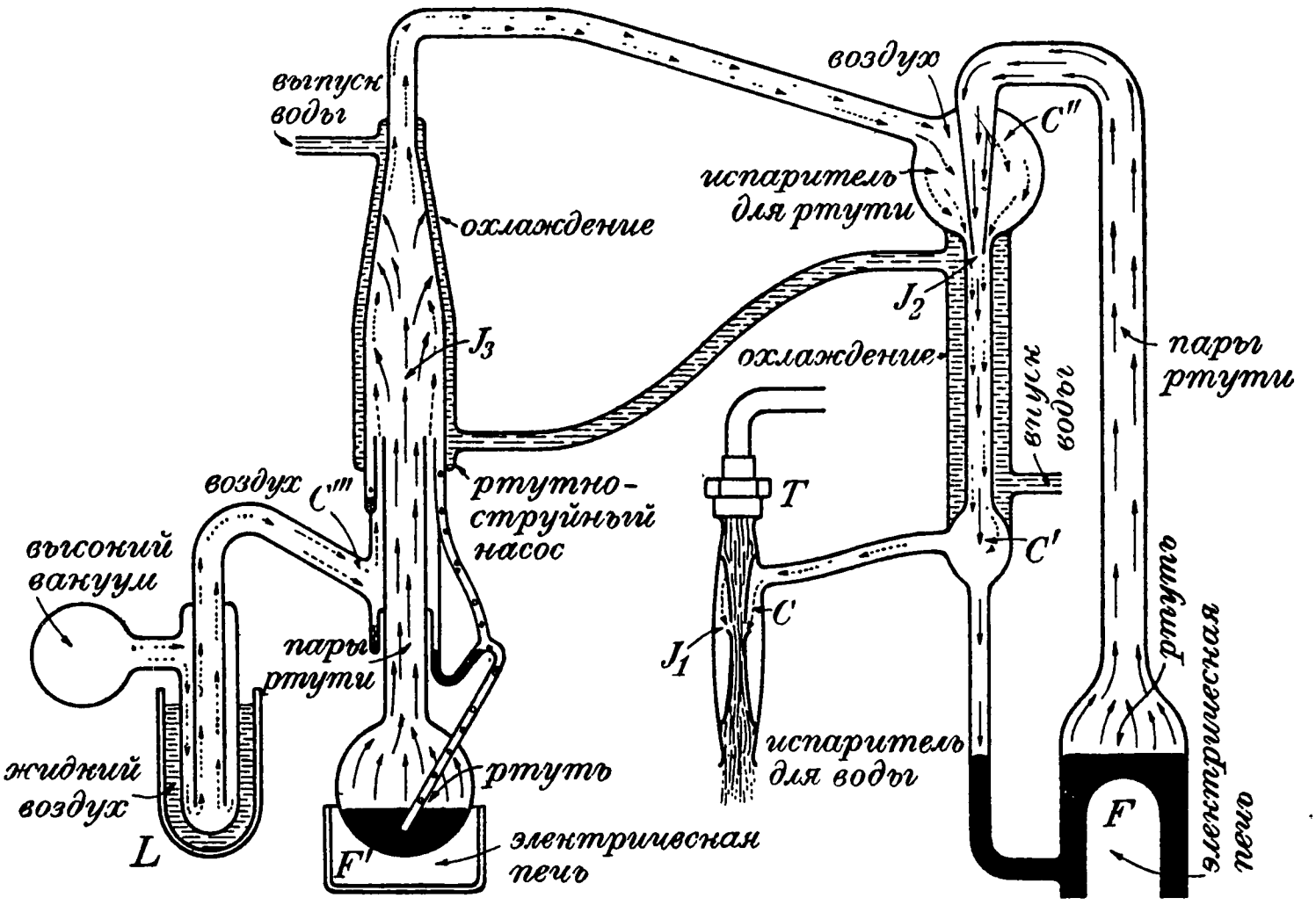


Рис. 31.

40. Опыт Паскаля. Паскаль придумал другой метод для проверки того, действительно ли столб ртути в «пустой» трубке поддерживается только весом наружного воздуха.

Он исходил из того, что давление в жидкости уменьшается по мере приближения к поверхности. Значит, и атмосферное давление должно тоже уменьшаться при подъеме от уровня моря на вершину горы. Около Парижа не оказалось подходящей горы, поэтому Паскаль проделал опыт Торичелли на высокой башне. Там он действительно нашел незначительное уменьшение столба ртути. Тогда он написал своему зятю Перрье, жившему на юге Франции, около вершины Пюи-де-Дом, с просьбой произвести тот же опыт на большой вы-

соте. Перрье ответил ему, что он был «восхищен и поражен», заметив, что на высоте 1 000 *м* ртуть в трубке опустилась примерно на 8 *см*. Это было в 1648 г., через 5 лет после открытия Торичелли. В настоящее время геологические партии при спусках и подъемах определяют высоту по изменению барометрического давления. Падение барометра на 1 *мм* соответствует подъему, примерно, на 12 *м*.



РТУТНО-СТРУЙНЫЙ ВОЗДУШНЫЙ НАСОС.

На этом рисунке показан новейший вид воздушного насоса. Его эффективность более чем в миллион раз превышает эффективность механического воздушного насоса, изобретенного Отто фон-Герике. Он основан на следующем принципе. Струя воды, вытекающая из обыкновенного крана T, проходит через сопло J_1, и увлекает с собою воздух в камеру C. Таким образом, давление в C' понижается до 10—15 *мм* ртутного столба. Далее, струя ртути J_2, получающаяся вследствие кипения ртути в электрической печке F, увлекает воздух из камеры C″, где таким образом, давление понижается, положим, до 0,1 *мм* ртутного столба. Далее, другая струя ртути J_3 (полученная от кипения ртути в печке F') уносит с собою молекулы воздуха из C'''. Наконец, благодаря сосуду с жидким воздухом, замерзают пары ртути, которые могли бы иначе пробраться через C''' в область высокого вакуума. В этой области, в конце концов, остается так мало воздуха, что давление достигает всего одной стомиллионной *мм* ртутного столба. Теперь такими насосами пользуются для откачки катодных ламп и высоко-вакуумных выпрямителей, приобретающих большое значение в технике. Честь изобретения этого вида насосов принадлежит соотечественнику Герике, немецкому профессору Гедэ из Фрейбурга. Усовершенствован этот тип насосов был американцами Ирвинг Лэнгмюиром и другими.

41. Барометр. Современный барометр (рис. 32) в сущности есть не что иное, как трубка Торичелли. Найти показание барометра значит просто точно измерить высоту столба ртути. Эта высота в местностях, лежащих, примерно, на уровне моря, меняется от 73 до

76,5 *см*, так как волнения в атмосфере меняют давление на земной поверхности так же, как вихри и сильные волны в чане с водой меняли бы давление воды на дно чана.

Хотя барометр и не предсказывает погоду непосредственно, но замечено, что вскоре за падением давления следует шторм. Таким образом, хотя барометр и не является непогрешимым пророком в области погоды, он все же очень полезен для предсказания погоды на несколько часов вперед. Наконец, отдельные станции, разбросанные по всей стране, каждые несколько часов посылают на центральную станцию телеграфные донесения о состоянии барометра. Сравнивая эти сведения, можно определить направление атмосферных течений, вызывающих изменения барометра и несущих шторм. Таким образом удается предсказать погоду даже на день или на два вперед.

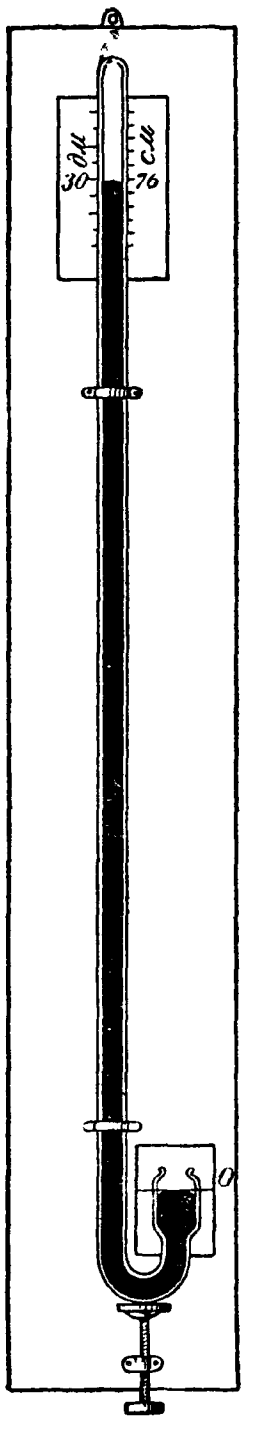


Рис. 32. Ртутный барометр.

42. Первые барометры. Сам Торичелли изготовил барометр, существенно не отличавшийся от барометра на рис. 32. Он пользовался им для наблюдений за изменениями атмосферного давления. Однако самым интересным из всех первых барометров был, пожалуй, барометр, сконструированный около 1650 г. городским головой немецкого города Магдебурга Отто фон-Г е р и к е (1602 — 1686). В его барометре вместо ртутного столба находился водяной столб, верх которого проходил сквозь крышу его дома. На поверхности воды плавала деревянная фигурка. В хорошую погоду она показывалась над крышей дома, в плохую — скрывалась из виду. Видя это, соседи Герике обвинили его в союзе с сатаной.

43. Барометр-анероид. Ртутный барометр громоздок и не портативен. Поэтому геологические экспедиции обычно употребляют так называемый б а р о м е т р - а н е р о и д. Он состоит из одной или нескольких герметически закупоренных цилиндрических коробок; верх каждой коробки — металлическая пластинка, слегка прогибающаяся при изменении атмосферного давления. Движение пластинки, усиленное посредством системы рычажков, передается стрелке, движущейся по циферблату. Деления на циферблате нанесены по сравнении с ртутным барометром. Эти приборы настолько чувствительны, что отмечают измене-

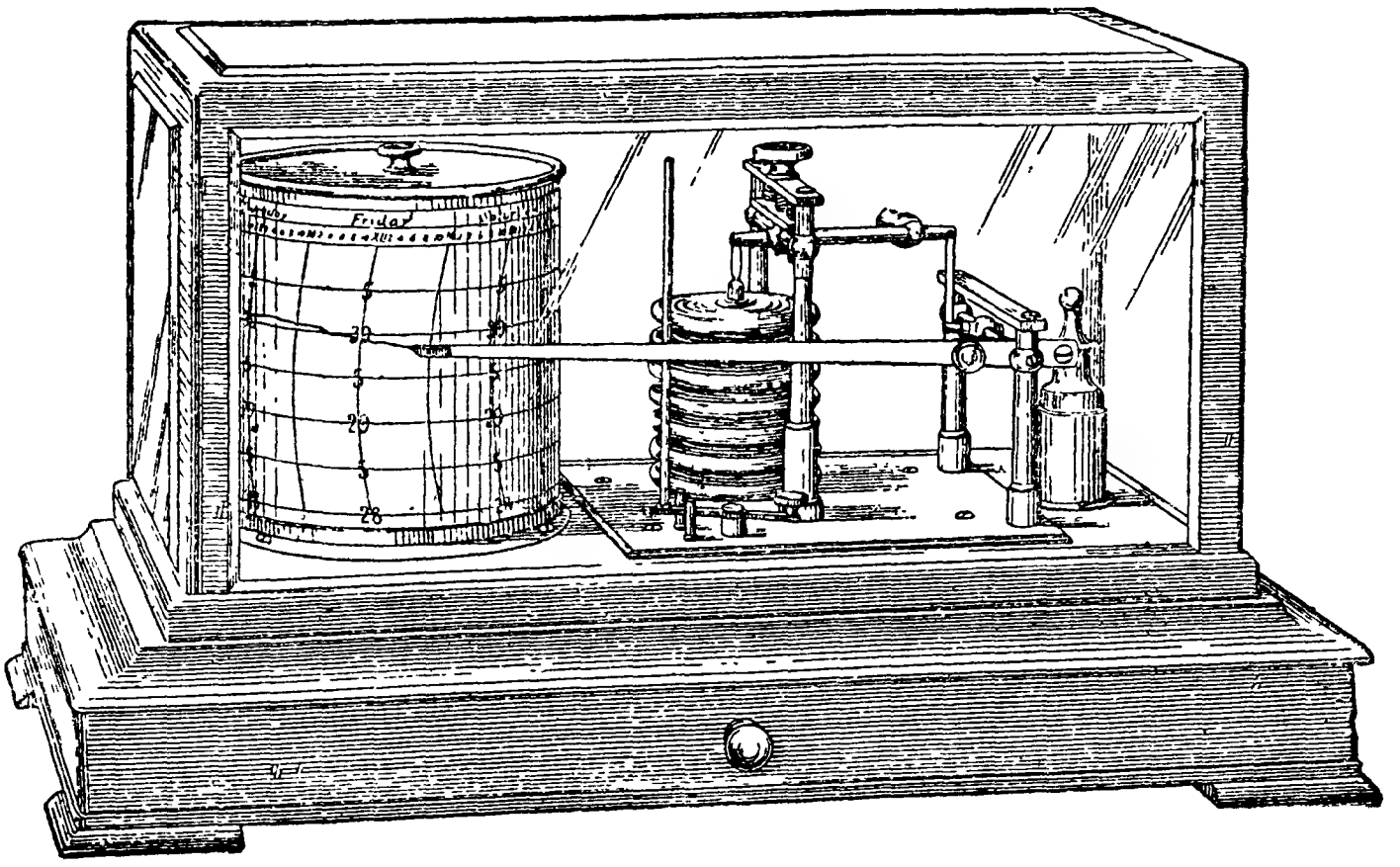


Рис. 33. Барограф-анероид.

ние давления даже при переносе их со стола на пол. Самопишущий барометр-анероид, или барограф, состоит для большей чувствительности из нескольких коробок. Давление записывается чернилами на бумаге, намотанной на барабан. Внутри барабана находится часовой механизм, заставляющий барабан делать 1 оборот в неделю.

Несколько иной разновидностью барографа пользуются авиаторы для записи высоты.

Резюме. **Воздух имеет вес. Один *куб. см* воздуха весит при 0° С 0,001293 *г*. Вследствие тяжести атмосферы давление ее на уровне моря равно весу ртутного столба в 76 *см;* это эквивалентно 1033,6 *г* (около 1 *кг*) на *кв см*. Атмосферное давление уменьшается при увеличении высоты места над уровнем моря. Уменьшение давления на 1 *мм* соответствует, при сравнительно небольшой высоте над уровнем моря, подъему, приблизительно на 12 *м*. Предсказания погоды только частично основаны на предсказаниях барометра. Быстрое падение барометра обычно сопровождается штормом.**

Вопросы и задачи.

1. Измерьте в метрах размеры классной комнаты и вычислите количество килограммов воздуха в ней.

2. Поверхность тела среднего мужчины равна приблизительно 1,5 *кв. м*. С какой силой давит на него атмосфера? Почему человек не замечает этой силы?

3. Если налить воды в стакан и покрыть его листом писчей бумаги (рис. 34), стакан можно опрокинуть, не пролив воду. Почему? Какую роль играет при этом бумага?

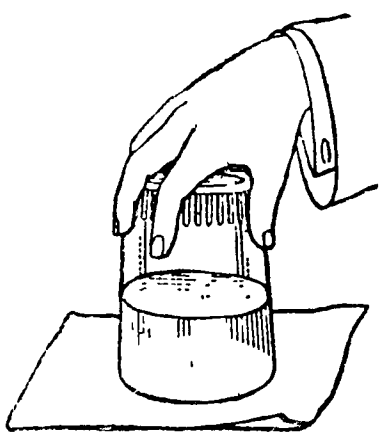


Рис. 34.

4. Сделайте чертеж простого Торичеллиевого барометра, написав против каждой части прибора ее название.

5. Может ли атмосферное давление поддерживать ртуть в трубке с диаметром, равным вашей кисти, на такой же высоте, как в трубке шириной в палец? Объясните подробно.

6. Насколько поднималась и опускалась фигурка в водяном барометре Герике при изменении высоты столба ртутного барометра на 5 *см*?

7. Назовите три причины, заставившие при изготовлении барометров предпочесть воде ртуть.

8. Пилот поднялся на воздушном шаре, его барометр показывал 18 *см*. Каково было там давление атмосферы?

9. За время сильного шторма барометр упал с 76 *см* до 70 *см*. Насколько изменилось при этом атмосферное давление (в *кг* на *кв. см*)?

10. Магдебургские полушария (см. стр. 31) названы так в честь изобретателя их Отто фон-Герике, городского головы города Магдебурга. Если плотно сложить полушария и затем выкачать из них воздух, раздвинуть их оказывается чрезвычайно трудно. Почему?

11. Диаметр подлинных полушарий Герике был 55 *см*. Какую силу пришлось употребить, чтобы разнять их, когда из полушарий был выкачан весь воздух? Найдите атмосферное давление на круг радиусом в 27,5 *см*.

УПРУГОСТЬ ВОЗДУХА.

44. Несжимаемость жидкостей. До сих пор мы видели, что наш воздушный океан поразительно похож на океан воды. Теперь нам предстоит познакомиться с существеннейшим различием между ними.

Нальем в цилиндрический сосуд 1 *л* воды, потом добавим еще литр. Всем отлично известно, что уровень воды повысится ровно вдвое. Если же вместо 1 *л* налить 10 *л*, уровень повысится в 10 раз.

Это значит, что первый, самый нижний литр воды не сжался сколько-нибудь заметно под давлением верхних слоев воды.

Тщательнейшие опыты показали, что даже колоссально большое давление не в состоянии произвести заметного эффекта. Так, напр., если 1 *куб. см* воды подвергнуть огромному давлению в 3 000 *кг*, объем его делается равным 0,90 *куб. см*. Другими словами, в океане, на глубине 10 *км*, данный объем воды уменьшается только на 3%.

Поэтому говорят, что вода и вообще жидкости практически несжимаемы. Если бы это было неверно, мы не могли бы давление на любой глубине под уровнем жидкости считать просто равным произведению глубины на плотность жидкости на ее поверхности.

45. Сжимаемость воздуха. Оказывается, что в отношении давления воздух ведет себя совершенно иначе, чем вода. Ничего не стоит сжать любое количество воздуха до половины, пятой или десятой части его нормального объема. В этом мы убеждаемся каждый раз, когда надуваем шину или пневматическую подушку.

С другой стороны, мы убеждаемся в способности воздуха р а с ш и р я т ь с я (т. е. в стремлении его вернуться к большему объему, как только прекратилось давление) всякий раз, когда лопается теннисный или футбольный мяч или когда из проколотой шины вырывается струя воздуха.

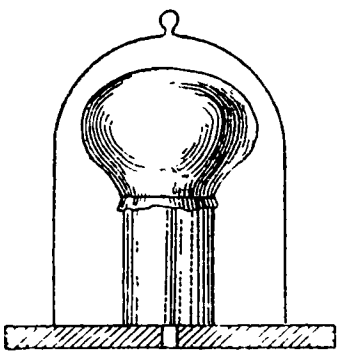


Рис. 35.

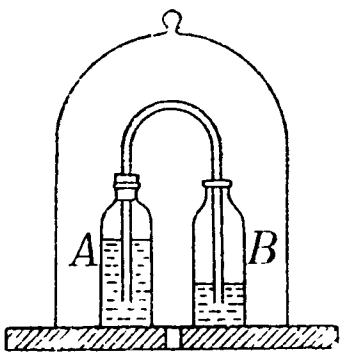


Рис. 36.

Иллюстрация способности воздуха расширяться.

Эта способность расширяться при уменьшении давления присуща всякому воздуху, а не только воздуху, загнанному в пневматическую подушку насосом. Обыкновенный комнатный воздух точно также расширяется при уменьшении давления. Чтобы убедиться в этом, проделываем такой опыт.

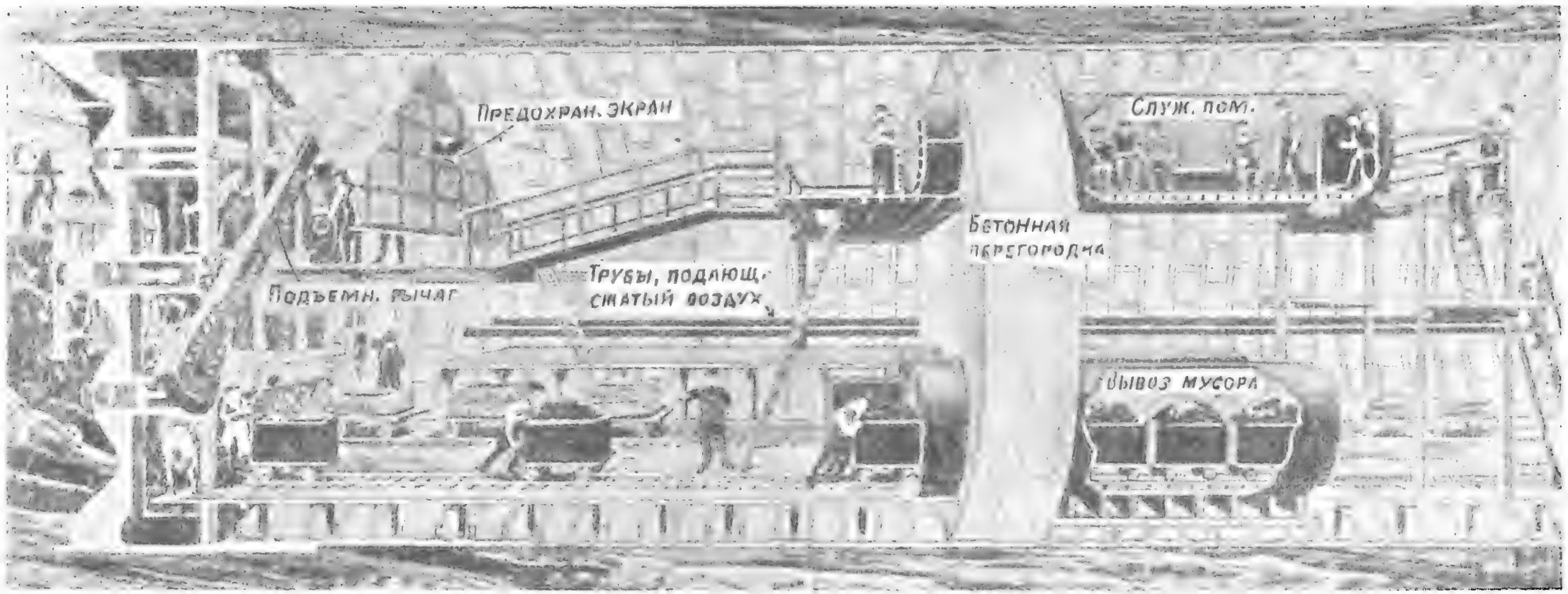
Поставим на тарелку воздушного насоса стакан, крепко закупоренный сверху резиновой пленкой. Как только насос начнет действовать, воздух в стакане расширится настолько, что разорвет резину или по крайней мере сильно ее растянет (см. рис. 35).

Еще один опыт. Установим 2 склянки на тарелке воздушного насоса, как показано на рис. 36. Одну закупорим герметически, а другую оставим открытой. Когда воздух будет выкачан, вода из *A* перейдет в *B*. Если напустить воздух в воздушный колокол, вода потечет обратно из *B* в *A*. Объясните, почему.

46. Почему полые тела выдерживают атмосферное давление. Предыдущие опыты дают нам ответ на вопрос, почему полые тела не продавливаются под действием гигантского давления атмосферы? Ведь при нормальном атмосферном давлении на мыльный пузырь диаметром в 15 *см* со всех сторон давит сила, в общем равная 1 *т*. Но дело в том, что воздух, находящийся внутри таких тел, изнутри давит на стенки с такой же силой, как окружающий воздух снаружи. В опыте § 35 воздух был вытеснен изнутри поднимающимися парами. Стоило только сконденсировать эти пары холодной водой, как внутреннее давление сделалось очень малым и внешнее давление раздавило банку. В опыте, показанном на рис. 35, мы с помощью насоса осла-

били внешнее давление. И тогда внутреннее давление разорвало резиновую пленку.

47. Закон Бойля. Ирландец Роберт Бойль (1627 — 1691) первый изучал точную зависимость между изменением давления газа



ПОСТРОЙКА ПОДВОДНОГО ТУННЕЛЯ.

Во время постройки подводного туннеля рабочим приходится работать при повышенном давлении воздуха; которое должно быть настолько велико, чтобы противостоять давлению, стремящемуся вогнать землю и грязь в рабочее помещение. По мере удаления материала (см. левый край рисунка) мощный кран продвигает вперед цилиндрический щит, внутри которого кладутся железные обручи, поддерживающие туннель. Цементная стена отделяет рабочее помещение со сжатым воздухом (налево) от пространства направо, где господствует атмосферное давление. Прежде чем войти в помещение с высоким давлением, человек попадает в служебное помещение, и остается там несколько минут, в течение которых там постепенно увеличивается давление воздуха. Это называется «сжатием» человека. Таким образом кровь наполняется воздухом, входящим через легкие. Прежде чем покинуть помещение с высоким давлением, человек опять попадает в служебное помещение, где давление постепенно уменьшают до атмосферного. При этом избыток воздуха уходит из крови через легкие. Если вести этот процесс слишком быстро, в кровеносных сосудах образуются пузырьки выходящего из крови газа, что причиняет сильную боль, а иногда и смерть. Вагонетки, нагруженные обломками пород, землей и грязью удаляются, как показано внизу рисунка.

и изменением его объема. Проделаем опыт, являющийся видоизменением подлинного опыта Бойля. Хотя он производил свои лабораторные исследования гораздо тщательнее, чем мы это сделаем, все же наш опыт даст нам понятие о методе, с помощью которого Бойль открыл важный закон, носящий теперь его имя.

Нальем в согнутую трубку столько ртути, чтобы она стояла на одном уровне в запаянном колене AC и в открытом BD (рис. 37). В AC находится некоторый определенный объем воздуха под давлением в 1 атмосферу. Назовем это давление P_1. Пусть объем AC будет V_1. Будем теперь подливать в BD ртути, пока разность уровней ртути в обоих коленах не сделается равной высоте ртутного столба в барометре. Воздух в запаянном колене находится теперь под давлением 2 атмосфер. Пусть это давление P_2. Измерим новый объем этого воздуха $A_1C = V_2$. Оказывается, V_2 ровно вдвое меньше V_1.

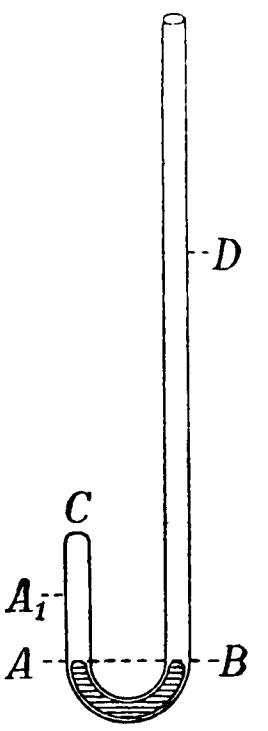


Рис. 37. Один из способов демонстрации закона Бойля.

Итак, при удвоении давления объем газа уменьшается вдвое. Если бы мы утроили давление, объем свелся бы к $^1/_3$ первоначального и т. д. Т. е. давление, производимое данным количеством газа на стенки сосуда, при постоянной температуре обратно пропорционально занимаемому газом объему.

Алгебраически это можно записать так:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad \text{или} \quad P_1V_1 = P_2V_2.$$

Это и есть закон Бойля. Можно выразить его в несколько иной форме. Удвоение, утроение или учетверение давления должно удваивать, утраивать или учетверять плотность газа, так как объем его становится половиной, третью или четвертью первоначального объема, а масса остается неизменной. Следовательно, давление газа при постоянной температуре прямо пропорционально его плотности.

48. Измерение давления газа. Для измерения давления газов и паров употребляют манометры самого различного устройства. Один из лучших манометр Бурдона. На рис. 38 (2) показана простая форма манометра Бурдона, употребляемая для измерения упругости воздуха в автомобильных шинах. Манометр этот состоит из согнутой в дугу металлической трубки (рис. 38 (1)). Когда в ней увеличивается давление, трубка стремится разогнуться. Движение ее при помощи рычажка R и зубчатки P передается стрелке. Эти манометры показывают избыток давления над атмосферным. Таким образом абсолютное (полное) давление равно давлению, показываемому манометром, + 1,033 *кг* на *кв. см* на уровне моря.

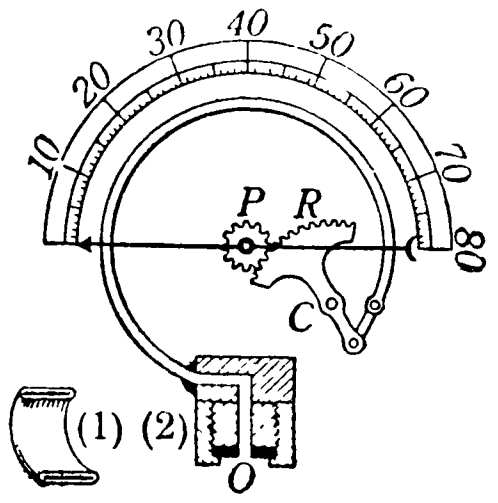


Рис. 38. Внутреннее устройство манометра Бурдона.

49. Протяжение и характер земной атмосферы. Вследствие сжимаемости воздуха и его способности расширяться, понятно, что воздух, в противоположность воде, делается все менее и менее плотным по мере удаления от поверхности земли. Так, напр., на вершине Монблана, на высоте около 5 *км*, высота барометра равна всего только 38 *см*, т. е. $^1/_2$ высоты его на уровне моря. Значит, по закону Бойля, плотность воздуха там тоже ровно вдвое меньше, чем на уровне

моря. Кривая на рис. 39 указывает скорость уменьшения плотности и давления с увеличением высоты.

Ни один летчик не поднимался выше 13 *км*. В 1862 г. два смелых английских аэронавта Глэйшер и Кокевель достигли высоты приблизительно в 11 *км*. На этой высоте барометр падает приблизительно до 18 *см*. Оба аэронавта не могли пошевельнуть ни одним членом, а Глэйшер потерял сознание. Кокевелю еле-еле удалось дернуть зубами канат, открывший нужный клапан, заставивший шар опуститься.

4 мая 1927 г. капитан САСШ Грэй благополучно поднялся на высоту около 13 *км*. Это удалось ему благодаря искусственному вдыханию кислорода.

10 октября 1924 г. французский авиатор Каллизо, из Виллаконблей во Франции, поднялся на аэроплане на высоту в 12,5 *км*. Температура, записанная на этой высоте, была на 100° F ниже нуля.

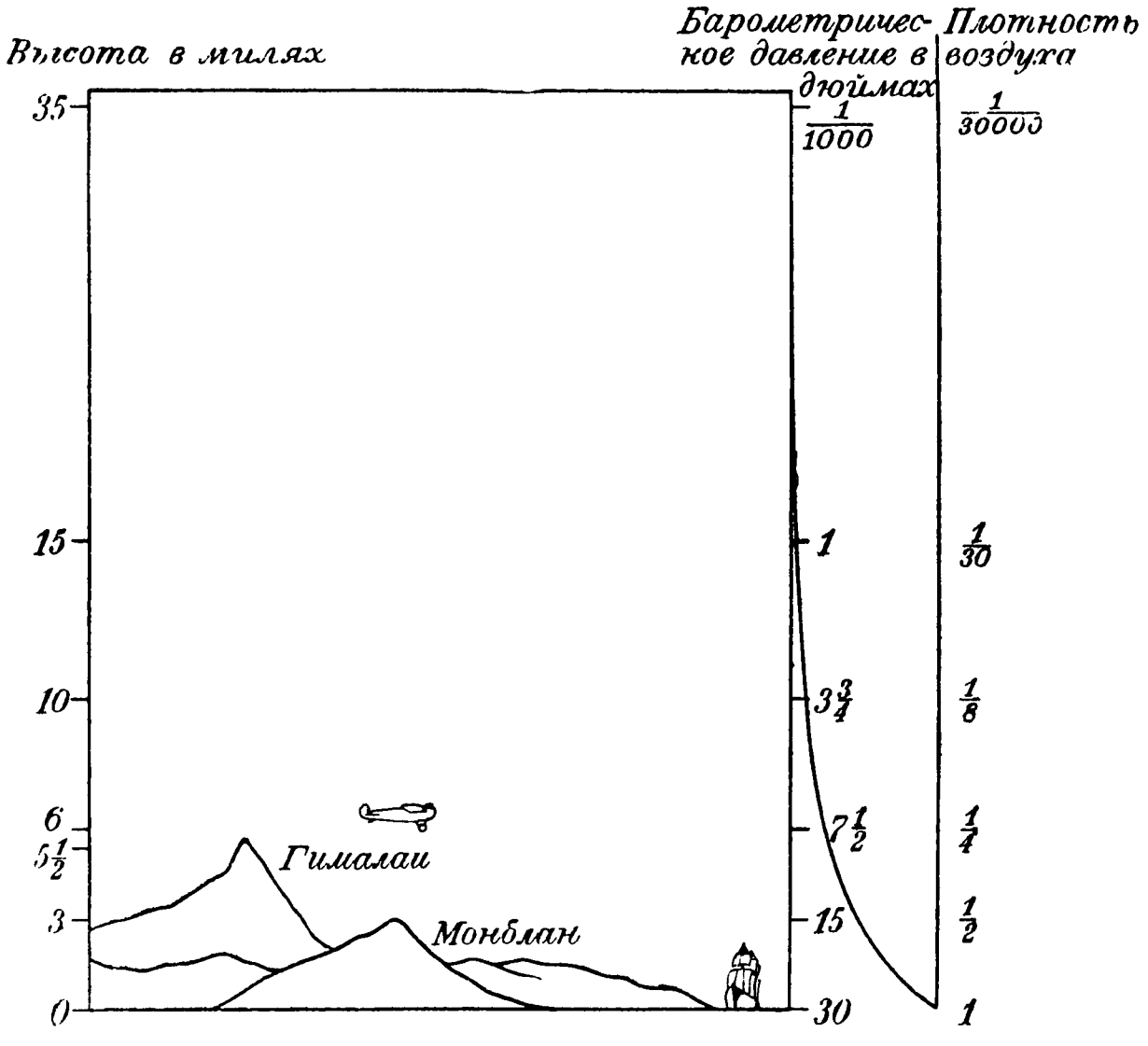


Рис. 39. Протяжение и характер атмосферы.

Верхние слои атмосферы изучаются с помощью шаров-зондов. Шары эти, снабженные самопишущими термометрами и барометрами, поднимаются до большой высоты; там они лопаются, а инструменты плавно опускаются на парашютах. Таким способом, атмосфера исследована до высоты в 35 080 *м*; эта высота была достигнута 7 декабря 1911 г. маленьким шаром, поднявшимся в итальянском городе Павии.

Эти крайние высоты отмечаются самопишущими барометрами. Повидимому, на высоте в 56 *км* плотность воздуха равна всего $\frac{1}{30000}$ плотности его на уровне моря.

Зная, на какой угол опустилось солнце под горизонт, когда исчезают последние следы света, можно вычислить высоту атмосферы. Оказывается, на высоте в 72 *км* воздуха еще достаточно, чтобы отражать некоторое количество света. Как далеко за этим пределом простирается чрезвычайно разреженная атмосфера, — неизвестно. На этот счет существует целый ряд предположений. Все они проводят границу атмосферы между 150 и 750 *км*. Эти вычисления основаны на наблюдениях высоты северного сияния, высоты, на которой

загораются метеоры, и на потемнении лунной поверхности непосредственно перед лунным затмением.

Резюме. **Жидкости, практически, несжимаемы. Они производят давление, пропорциональное глубине под уровнем свободной поверхности. Газы, будучи чрезвычайно сжимаемыми, не следуют этому правилу.**

Закон Бойля. Давление, производимое данной массой газа при постоянной температуре, обратно пропорционально ее объему или прямо пропорционально его плотности.

Вопросы и задачи.

1. Подуйте изо всех сил в трубку, вставленную в бутылку с водой (рис. 40). Затем выпустите трубку изо рта. Объясните все, что при этом произойдет.

2. Из-под одежды водолаза проскакивают пузырьки воздуха. Они поднимаются на поверхность воды. Как при этом меняется их объем?

3. Вспоминая опыт с резиновой пленкой, которая лопнула, когда из-под колокола воздушного насоса был выкачан воздух, объясните, почему восхождение на высокие горы часто вызывает боль и кровотечение из ушей и из носу.

4. При испытании прочности котлов и всякого рода стальных сосудов их всегда предпочитают наполнять водой, а не воздухом. Почему?

5. Самая большая глубина в океане, достигнутая лотом, 9,7 *км*. Каково на этой глубине давление (в тоннах на *кв. см*). Удельный вес океанской воды = 1,026. Достигнет ли камень, брошенный за борт, дна океана? Объясните.

6. Почему, когда наливают керосин из жестянки, из горлышка идет хорошая струя, только если открыть пробку в жестянке.

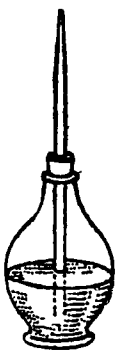


Рис. 40.

7. 100 *куб. м* водорода при нормальном давлении заключены в стальной резервуар, емкость которого равна 5 *куб. м*. Каково абсолютное давление газа в *кг* на *кв. см*? Каково его барометрическое давление?

8. В цилиндре, длина которого 1,5 *м*, а площадь поперечного сечения — 0,5 *кв. м*, находится газ при барометрическом давлении в 100 *кг* на 1 *кв. см*. Сколько куб. метров занимал бы этот газ при нормальном атмосферном давлении?

9. 1 000 *куб. см* газа находятся под давлением в 80 *см* ртутного столба, Какое давление потребуется, чтобы при постоянной температуре уменьшить объем этого газа до 600 *куб. см*?

10. Автомобильная шина емкостью в 22,5 *куб. дм* надута до барометрического давления в 3 *кг* на *кв. см*. Какова плотность воздуха внутри шины? До какого объема расширился бы воздух?

11. К лоту прикреплена стеклянная трубка длиной в 60 *см*, верхний конец которой запаян. Лот с трубкой опускают на дно океана, а затем поднимают. Оказывается, что океанская вода смочила 55 *см* внутренней поверхности трубки. Под каким давлением (в атмосферах) находился воздух в трубке на дне океана? Какую часть этого давления производила вода? Какова глубина океана (удельный вес воды в океане = 1,026).

12. При обычных условиях 1 *г* воздуха занимает объем приблизительно в 800 *куб. см*. Каков будет объем 1 *г* воздуха на вершине Монблана (высота его 4,8 *км*), где барометрическое давление примерно в два раза меньше, чем на уровне моря?

13. Средняя плотность воздуха на уровне моря около 0,0012 *г* на *куб. см*. Какова его плотность на вершине Монблана? Какую часть земной атмосферы оставил позади себя путешественник, добравшись до вершины этой горы?

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ.

50. Сифон. Наполните резиновую или стеклянную трубку водой и установите ее, как показано на рис. 41.

Вы увидите, что по трубке потечет вода из сосуда *A* в сосуд *B*. Если

затем поднять B так, чтобы уровень воды в B был выше, чем в A, вода потечет по трубке в обратном направлении. Такой прибор называется **сифоном.**

Он бывает очень полезен, когда нужно перелить жидкость из сосуда, который нельзя опрокинуть или когда хотят снять верхние слои жидкости, не взбудораживая нижних слоев. Сифон нашел себе целый ряд применений в технике.

Объяснение действия сифона явствует из рис. 41. Трубка acb наполнена водой. Ясно, что вода эта потечет по трубке, если сила, толкающая воду в одном направлении, больше силы, толкающей воду в другом направлении. Давление в a направлено снизу вверх и равно атмосферному давлению, минус давление столба воды ad. Давление в b тоже направлено снизу вверх и равно атмосферному, минус давление столба воды be. Таким образом, давление в a превосходит давление в b. Избыток равен давлению столба воды fb. Очевидно, сифон перестанет действовать, если вода в обоих сосудах будет на одном уровне, так как тогда $fb = 0$. Тогда силы, действующие на обоих концах трубки, равны по величине и направлены в противоположные стороны. Сифон не будет работать и в том случае, когда c находится выше, чем на 10,33 *м* над уровнем воды в A, так как атмосферное давление не может поднять воду в трубках на большую высоту. Мог бы сифон действовать в пустоте?

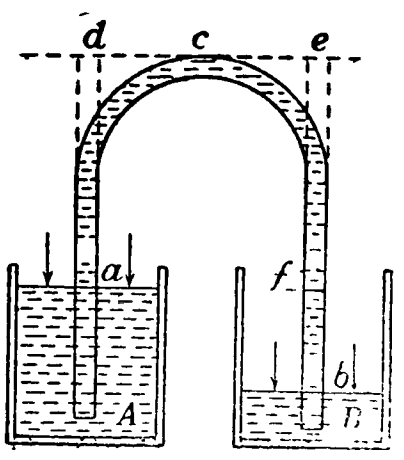


Рис. 41. Сифон.

51. Перемежающийся сифон. На рис. 42 изображен перемежающийся сифон. Положим, что сосуд пуст. До какого уровня надо его наполнить, чтобы вода стала вытекать через отверстие O? До какого уровня должна опуститься вода в сосуде, чтобы прекратилось вытекание воды?

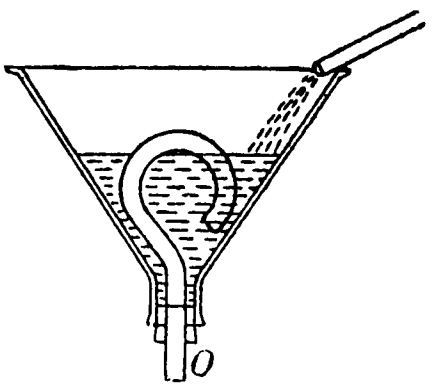


Рис. 42. Перемежающийся сифон.

52. Воздушный насос. Воздушный насос был изобретен Отто фон Герике в 1650 г. Заслуга его тем более велика, что он, повидимому, совершенно не был знаком с открытиями Галилея, Торичелли и Паскаля, сделанными за несколько лет до этого и касающимися характера земной атмосферы. На рис. 43 показан простой разрежающий воздушный насос. Когда поршень поднят воздух из приемника R поступает через клапан A в цилиндр B. При опускании поршня воздух в B сжимается, клапан A закрывается и открывается выводной клапан C. Таким образом, при каждом двойном ходе поршня некоторая часть воздуха из R выводится наружу.

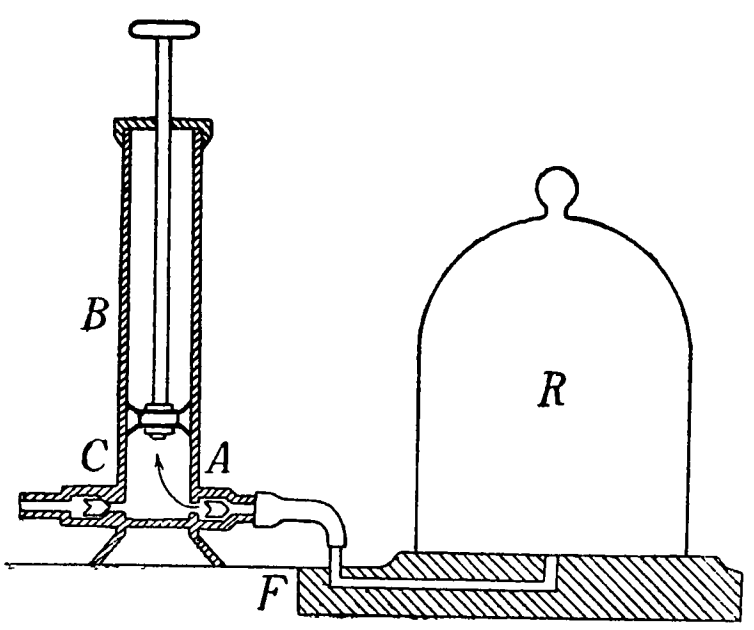


Рис. 43. Простой воздушный насос.

Во многих насосах клапан C находится в самом поршне.

53. Нагнетательный воздушный насос. Нагнетательный насос употребляют для накачивания газа в резервуар. Если насос, изобра-

женный на рис. 43, отделить от тарелки приемника и соединить клапан C с резервуаром, в который требуется сжать газ, мы получим нагнетательный насос.

Применения сжатого воздуха чрезвычайно многочисленны: воздушные сверла (употребляемые в горном деле), воздушные тормоза, воздушный мотор и т. д. Поэтому в промышленном отношении нагнетательный насос гораздо важнее разрежающего.

(См. рис. на стр. 38, иллюстрирующий постройку туннелей.)

54. Всасывающий водяной насос. Обыкновенный водяной насос (рис. 44) употребляется по крайней мере со времен Аристотеля (IV век до нашей эры). На рис. 44 видно, что водяной насос попросту является упрощенной формой воздушного насоса. Действительно, первые несколько ходов поршня просто выкачивают воздух из трубки, находящейся под клапаном b. Даже самый совершенный насос не мог бы поднять воду до S, если бы клапан a находился над уровнем воды W выше, чем на 10,33 *м*. Почему? В виду технических несовершенств обычно этот предел сводится в действительности к 8,5 *м*. Пусть учащийся шаг за шагом разберет процесс выкачивания воды из колодца с помощью насоса, изображенного на рис. 43. Часто бывает гораздо легче пустить в ход такой насос, если налить сверху немного воды. Почему?

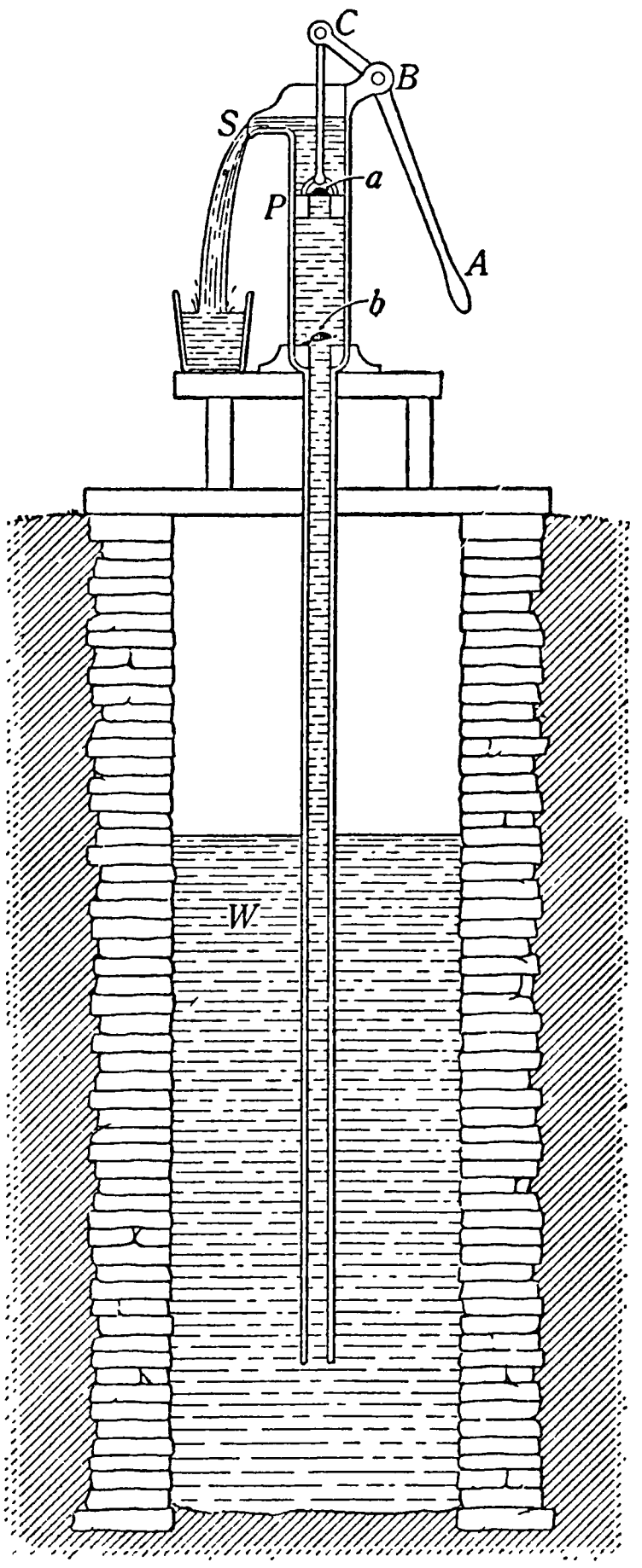


Рис. 44. Всасывающий насос

Насосы, употребляющиеся в очень глубоких колодцах, делаются с длинными с т е р ж н я м и, чтобы поршень P находился на должном расстоянии от воды.

55. Нагнетательный водяной насос. На рис. 45 изображен нагнетательный водяной насос. Этому изобретению по крайней мере 2 000 лет. Обычно нагнетательный насос употребляют, когда надо поднять воду выше, чем можно расположить сам насос. Пусть учащийся разберет действие насоса по приложенному чертежу.

Для того чтобы в трубку HS вода текла непрерывной струей и во время подъема поршня, между клапаном a и точкой выпуска воды устанавливается воздушная камера. Поршень, опускаясь, резко толкает в эту камеру воду, сжимающую находящийся в камере воздух. Благодаря противодействию этого сжатого воздуха в спускную

трубку течет струя воды. И так как противодействие это непрерывное, то и струя тоже непрерывна.

56. Картезианский водолаз. Великий французский филоосф Декарт (1596 — 1650) придумал забавный прибор, одновременно иллюстрирующий передачу давления жидкостями, закон Архимеда и сжимаемость газов. Полая стеклянная фигурка (см. рис. 46) с отверстием в нижнем конце помещена в сосуде с водой. Частью она заполнена водой, частью же воздухом, с таким расчетом, чтобы она плавала. Нажимая на резиновую пленку, покрывающую сосуд, можно, по желанию, заставить фигурку опуститься или подняться. Если трудно достать фигурку водолаза, можно вместо нее взять маленькую трубочку, закрытую с одного конца (рис. 46 (2)). Она работает еще лучше водолаза, и с ней даже яснее можно проследить самый принцип.

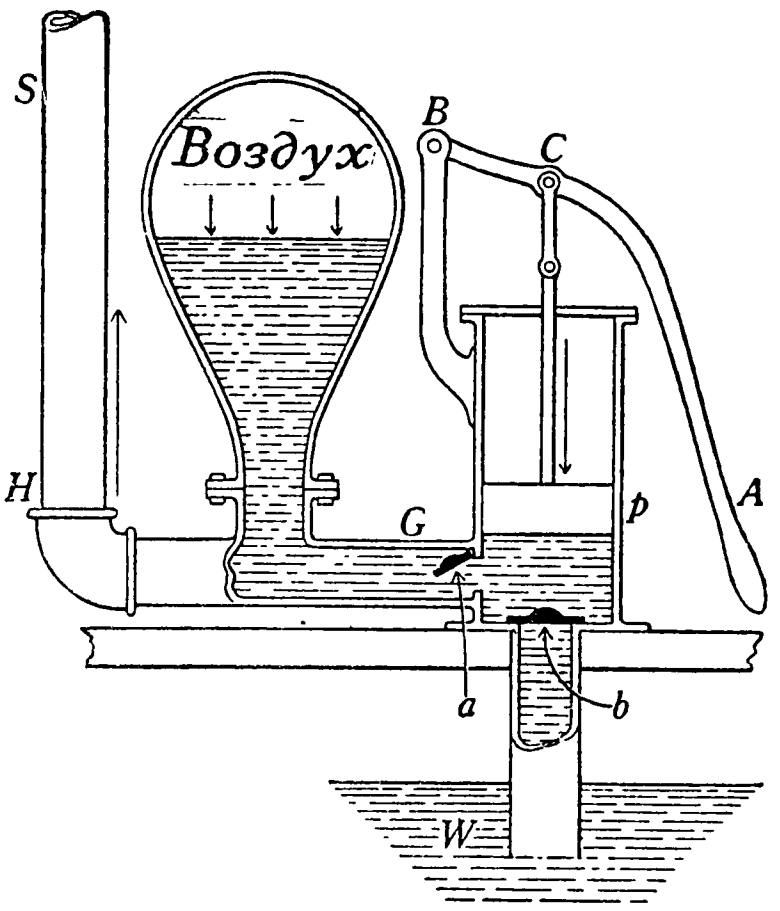


Рис. 45. Нагнетательный насос.

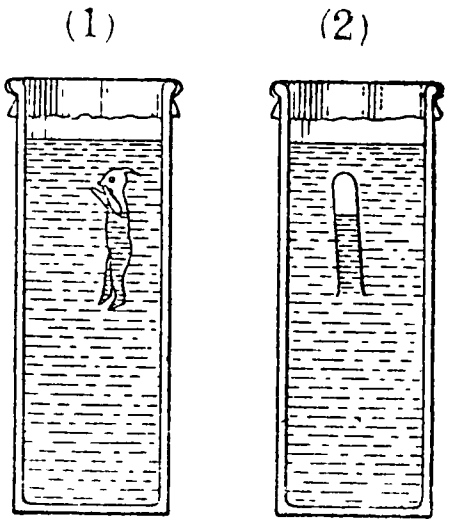
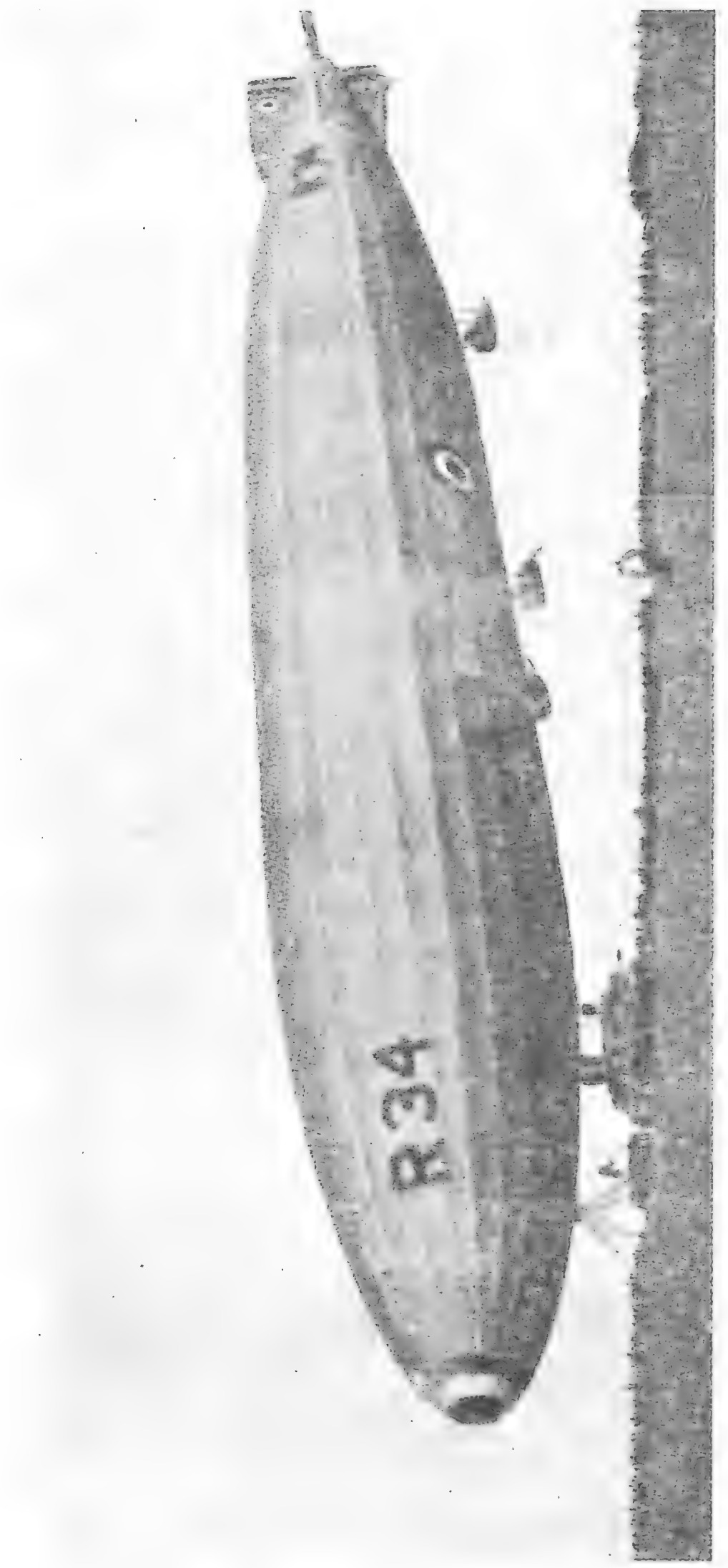


Рис. 46. Картезианский водолаз.

Современная подводная лодка (см. стр. 27), в сущности, не что иное, как гигантский картезианский водолаз, который над водой приводится в движение масляными или паровыми двигателями, а под водой — электрическими моторами, питающимися аккумуляторными батареями. Объем воздуха в камерах можно менять, впуская или выпуская воду. Ныряет подводная лодка с помощью комбинированного действия пропеллера и горизонтальных рулей.

57. Воздушный шар (аэростат). Самый вывод закона Архимеда (см. § 29, стр. 24) показывает, что он в одинаковой мере относится как к жидкостям, так и к газам. Следовательно, на всякое тело, погруженное в воздух, действует подъемная сила, равная весу вытесненного воздуха. Значит, если вес тела окажется меньше веса вытесненного воздуха, тело начнет подниматься. Когда веса эти равны, тело находится в равновесии в воздухе. Воздушный шар представляет собой большой шелковый мешок, пропитанный резиной и обычно наполненный водородом или светильным газом. Вес куб. метра водорода около 0,09 *кг*, а куб. метра светильного газа около 0,75 *кг*. Напомним, что кубический метр воздуха весит около 1,2 *кг*. Отсюда ясно, что подъемная сила кубического метра водорода (равная 1,2 — 0,09 = 1,11) в д а слишком раза превосходит подъемную силу светильного газа (1,2 — 0,75 = 0,45). Зная приведенные здесь веса, легко вычислить подъемную силу любого воздушного шара, объем которого известен.

Обычно при подъеме шар наполнен не целиком. Иначе шар лопнул бы, не достигнув большой высоты, так как при подъеме наружное давление все время уменьшается, и давление газа изнутри слишком натянуло бы оболочку шара. Если же шар при подъеме не совсем надут, он поднимаясь просто увеличивается в объеме. Так, напр., шар, которому надлежит подняться



ПРИБЫТИЕ В АМЕРИКУ БРИТАНСКОГО ДИРИЖАБЛЯ.

Снимок с R-34 в момент, когда его гондола коснулась земли. Это был первый перелет через океан машины легче воздуха (спуск 6 июля 1919 г.), причем было покрыто 3 200 морских миль (из Шотландии в Нью-Йорк). Он длился 4½ дня или 108 час. Вследствие суровой погоды и избранного пути, фактически было покрыто расстояние в 6 300 морских миль. Обратный путь в Шотландию дирижабль проделал в течение 75 часов. Размеры этого исторического воздушного корабля: длина — 224 *м*, высота — 30 *м*, диаметр — 26 *м*. У него было 5 двигателей, по 250—275 л. с. каждый. Дирижабль имел 19 газовых баллонов общей емкостью в — 70 000 *куб м*. Все двигатели были 12-цилиндровые. Рама сделана из дуралюминия. Общий вес 59 тонн, из коих 16 тонн приходилось на газолин. Дирижабль мог подниматься на высоту 4 700 *м*.

до высоты, где давление равно всего 7 *см* ртутного столба, должен быть на поверхности земли надут только до четверти своего объема.

Парашют (рис. 47) — это громадное зонтикообразное приспособление с помощью которого воздухоплаватель может невредимым опуститься на землю. Открытый парашют опускается очень медленно благодаря громадной поверхности, соприкасающейся с воздухом. Наверху в парашюте

имеется отверстие, через которое медленно выходит воздух; это заставляет парашют держаться вертикально.

58. Шары с гелием. Одним из последствий мировой войны было развитие производства гелиевых шаров. Гелий — невоспламеняющийся газ, в два раза плотнее водорода, с подъемной силой, равной 0,92 водородной.

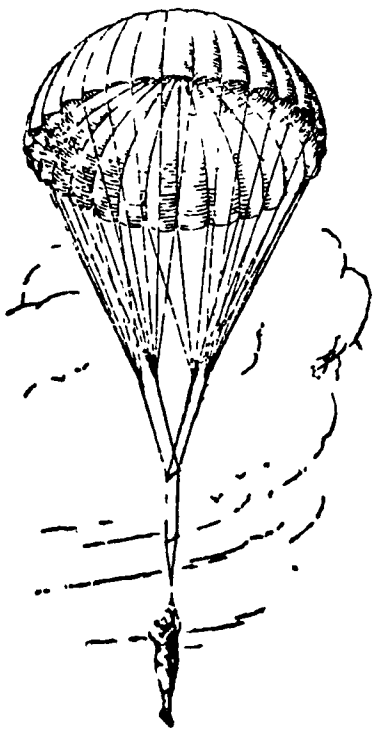


Рис. 47. Парашют.

Гелий — настолько редкий элемент, что до войны ни в одних руках не было собрано более 35 *куб. см* гелия. Довоенная цена гелия была около 100 рублей за *куб. см* гелия. Теперь гелий добывается в газовых колодцах в Техасе и Оклагоме, и *куб. см* его стоит около 2 центов. Добыча подъемного газа, вполне безопасного в пожарном отношении, открывает новую эру для дирижаблей (см. рис. на стр. 45).

59. Водолазный костюм. Почти при всех подводных работах употребляется водолазный костюм. Он сделан из резины и снабжен металлическим шлемом. Обычно водолаз сообщается с поверхностью трубкой, по которой ему посылается воздух. Выпускает он воздух через клапан в костюме. Но иногда водолаз совершенно отделяется от поверхности и берет с собой в ящике на спине запас воздуха, сжатого до 40 атмосфер. Воздух может постепенно с нужной скоростью выходить через клапан в костюм. Когда водолаз хочет подняться на поверхность, он просто-на-просто напускает в свой костюм достаточно воздуха и всплывает.

И в том и в другом случае водолаз находится под давлением, господствующим на достигнутой им глубине. Редко водолазы опускаются глубже 20 *м*, а 25 *м* обычно считается предельной глубиной, на которую можно спускаться без вреда.

Однако в 1915 г. в САСШ при поисках затонувшей около Гонолулу подводной лодки водолаз опускался до глубины в 100 *м*. При подъеме водолаз чувствует боль в ушах и над глазами. Когда же он находится в покое в глубине, болей нет. Дело тут в следующем: при подъеме уменьшается внешнее давление, и потому из внутренних полостей тела выходит воздух. Однако выходит он не мгновенно, и проходит некоторое время, пока установится одинаковое внешнее и внутреннее давление.

60. Газометр. Из городского резервуара газ поступает в газометр (см. рис. 48) через P и, пройдя отверстия O и O_1, попадает в отделения B и B_1 и давит на пленки A и A_1. Таким образом газ, находившийся в A и A_1, выталкивается через отверстия O и O_1 в трубу P_1, откуда он идет в городской газопровод.

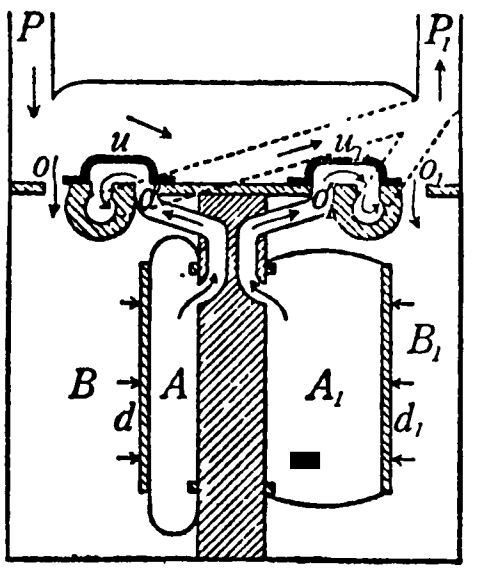


Рис. 48. Газометр.

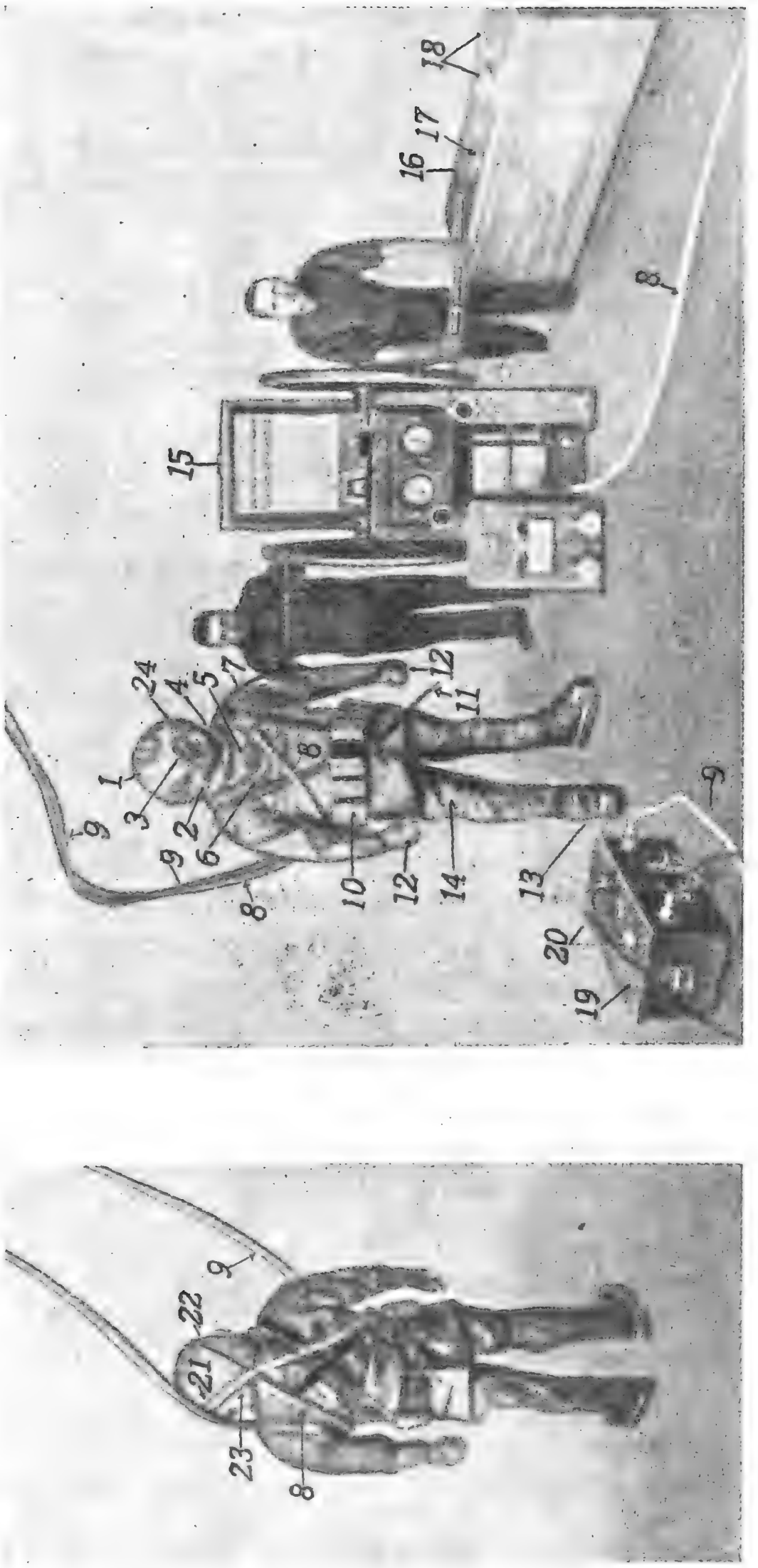
Когда пленка d достигает своей предельной деформации вправо, соединенный с ней рычажок заставляет золотник U сдвинуться налево и закрыть отверстие O, т. е. прервать сообщение между P и B. Но в то же время открывается O_1, и газ из P поступает через O_1 в отделение A. Это — первая четверть цикла. После следующей четверти — U_1 сдвигается вправо и соединяет A_1 с P и B_1 с P_1. Если бы U и U_1 двигались одновременно, давление газа в P претерпевало бы небольшие колебания.

Движения пленок учитывается с помощью часового механизма, причем

стрелки его показывают число кубических метров газа, прошедших через газометр.

Резюме. **Вода течет в сифоне вследствие различного давления в его неравных коленах.**

Воздушный насос — служит для выкачивания воздуха из сосуда. Он основан на естественном стремлении газов к увеличению объема.



СНАРЯЖЕНИЕ ВОДОЛАЗА.

1. Шлем. 2. Клапан для выпуска воздуха. 3. Лобовое окошко. 4. Отверстие для слюны. 5. Нагрудник. 6. Гайки нагрудника. 7. Контрольный клапан для впуска воздуха. 8. Воздушная камера. 9. Телефонный кабель. 10. Пояс с свинцовыми грузилами. 11. Ножи в ножнах. 12. Резиновые перчатки. 13. Бэтинки с свинцовыми подметками. 14. Брюки (из прорезиненной парусины) 15. Воздушный насос. 16. Ящик для снаряжения. 17. Отвертка для подвинчивания гаек. 18. Растягивающиеся обшлага. 19. Телефонный ящик. 20. Телефон. 21. Телефонная проводка. 22. Труба подводящая воздух. 23. Предохранительный запор в шлеме. 24. Комбинированный передатчик и приемник в шлеме.

В всасывающем водяном насосе поршень не должен быть выше предельной высоты, на которую атмосферное давление может поднять столб воды.

Нагнетательный водяной насос может поднять воду на любую высоту.

Подъем и спуск воздушных шаров происходит по закону Архимеда.

Водолазам приходится испытывать на себе закон давления жидкостей и закон Архимеда.

Вопросы и задачи.

1. Изготовим сифон, как показано на рис. 49. Для этого наполним колбу водой на одну треть, закупорим пробкой, воткнем в пробку две стеклянные трубки, как на рис. 49, и затем перевернем ее кверху дном так, чтобы нижний конец прямой трубки оказался в сосуде с водой. При достаточно большой длине согнутого колена в колбе будет бить сильный фонтан, пока сосуд с водой не опустеет. Объясните, почему.

2. Требуется удалить воду из чана, глубина которого 3 *м*, стоящего на некотором возвышении. Чан открыт только сверху. Сделать это можно только с помощью гибкой трубки. 1) Укажите наиболее удобный способ использования такой трубки. 2) Какой длины должна быть трубка, чтобы можно было вылить всю воду?

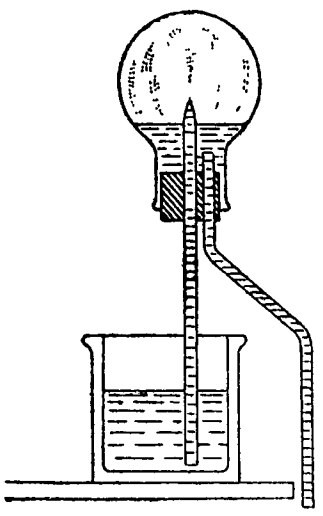


Рис. 49.

3. Удельный вес керосина 0,8. До какой высоты может поднять его сифон при нормальном давлении?

4. Опишите устройство поршневого воздушного насоса, употребляемого для откачки приемника, и объясните, как он действует.

5. Положим, что цилиндр воздушного насоса одинакового размера с приемником; сколько воздуха забрал насос из приемника после одного хода поршня? После 3-х? после 10-ти?

6. Пусть цилиндр воздушного насоса в 3 раза меньше приемника. Сколько воздуха остается в приемнике после 5 ходов поршня? Как велико давление внутри приемника, если внешнее давление равно 76 *см*?

7. Можно ли полностью выкачать весь воздух из сосуда, даже при совершенном насосе?

8. Сделайте чертеж всасывающего водяного насоса в момент подъема поршня. Что заставляет воду в трубе подниматься? Что наступает при опускании поршня?

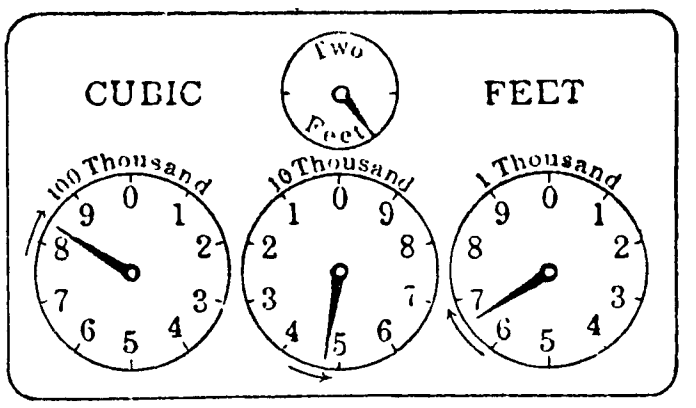
9. Сделайте чертеж нагнетательного водяного насоса в момент опускания поршня. Что происходит при поднятии поршня?

10. На какую предельную высоту может на уровне моря подняться керосин под поршнем всасывающего насоса над уровнем керосина в резервуаре? (Удельный вес керосина = 0,82.)

11. Чем определяется предельная высота подъема воздушного шара? Объясните это с помощью закона Архимеда.

12. Когда пилот хочет спуститься, он выпускает часть газа через верхний клапан и тем самым уменьшает объем шара. Почему это заставляет шар опускаться? Что должен сделать пилот, чтобы шар начал снова подниматься?

13. Объясните, почему поднимается воздушный шар, и в каком отношении к этому находится вес шара и давление атмосферы на него.



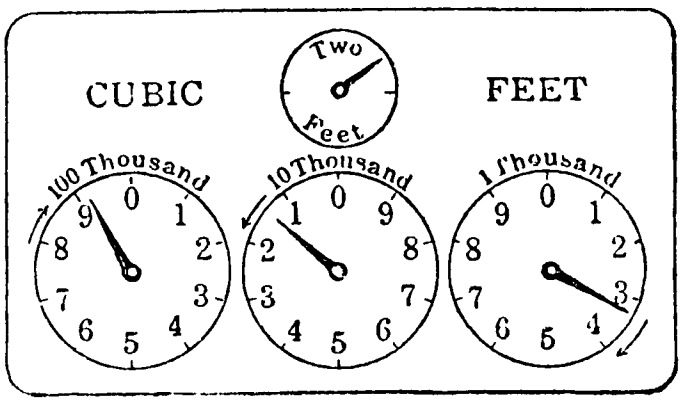


Рис. 50. Циферблаты газометра.

14. Сколько законов относительно жидкостей и газов иллюстрирует картезианский водолаз?

15. Водород легче воздуха. Если воздушный шар наполнен водородом до его предельной емкости, будет ли дальнейшее прибавление водорода увеличивать его подъемную силу? Объясните подробно.

16. Литр воздуха весит 1,29 *г*, а литр гелия — 0,18 *г* при 0° С. Какова подъемная сила маленького прорезиненного шелкового воздушного шара, весящего 10 *г* и наполненного 40 *л* гелия?

17. В кессон накачано столько воздуха, что уровень воды в нем на 1,033 *см* ниже уровня реки. Во сколько раз уменьшился первоначальный объем воздуха? (1 033 *г* на *кв. см* = 1 атмосфере.)

18. На рис. 50 верхняя половина изображает показание газометра в 84 600 куб. футов газа. Нижняя половина — показание газометра спустя месяц. Каков счет за газ за этот месяц, если 1 000 куб. фут. стоят 80 центов? Нарисуйте положение стрелок газометра при показании в 49 200 куб. футов.

19. В настоящее время во многих крупных магазинах устроены пневматические распределительные трубы для мелких пакетов. По трубам движется плотно пригнанная каретка. На одном конце трубы — разрежающий насос, на другом — нагнетательный. Какова сила, толкающая каретку, если с одной стороны каретки воздух наполовину выкачан, а с другой он вдвое плотнее нормального. Поперечное сечение каретки = 50 *кв. см*.

20. Подводная лодка весит 1 800 *т* при пустых подводных резервуарах. При этих условиях 10% всего объема подводной лодки находится над водой. Какое весовое количество воды надо впустить в резервуары, чтобы вся лодка погрузилась в воду?

ГЛАВА IV.

ДВИЖЕНИЕ МОЛЕКУЛ.

КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ГАЗОВ.

61. Молекулярное строение материи. Попытки объяснить некоторые простейшие явления природы, — напр., тот факт, что два вещества одновременно часто занимают, повидимому, один и тот же объем (два газа, заключенные в один сосуд или сахар, растворенный в воде), — привели к теории молекулярного строения материи. Согласно этой теории все вещества состоят из мельчайших частичек, называемых м о л е к у л а м и. Между молекулами есть расстояния или скважины. Таким образом, когда в сосуд, наполненный газом, входит другой газ, молекулы одного газа размещаются между молекулами другого. Молекулы невозможно рассмотреть даже в самые мощные микроскопы: размеры их чрезвычайно ничтожны. При нормальной температуре и нормальном давлении в одном кубическом сантиметре воздуха содержится двадцать семь биллионов биллионов (27.10^{18}) молекул. Такого количества песчинок было бы, примерно, достаточно, чтобы сделать песчаную насыпь длиной в 1,5 *км*, шириной в 35 *м* и вышиной в 1 *м*. Если плотно сложить тысячу молекул, то в самые лучшие микроскопы можно будет заметить только небольшое пятнышко.

62. Доказательство движения газовых молекул. Простейшие наблюдения приводят нас к убеждению, что молекулы газа находятся всегда в непрерывном и быстром движении, даже когда сам газ неподвижен. Так, например, если в комнату проникнет немного аммиака или другого сильно пахнущего газа, запах очень скоро почувствуется во всей комнате. Это значит, что в комнате во все стороны распространилось достаточное количество молекул, вызывающих раздражение обонятельных нервов.

Химики, в свою очередь, знают, что, наполнив один шар (см. рис. 51) водородом, а другой углекислым газом и оставив на несколько часов кран между ними открытым, мы сможем обнаружить

химическим анализом, что в обоих шарах оба газа содержатся в совершенно одинаковых пропорциях.

На первый взгляд это совершенно непонятно, — ведь углекислый газ примерно в 22 раза тяжелее водорода. Такое смешение газов, противоречащее, казалось бы, законам тяготения, называется д и ф ф у з и е й.

Итак, мы видим, что такие простые факты, как распространение запаха или диффузия газов, с очевидностью доказывают, что молекулы газа не находятся в покое, а постоянно движутся.

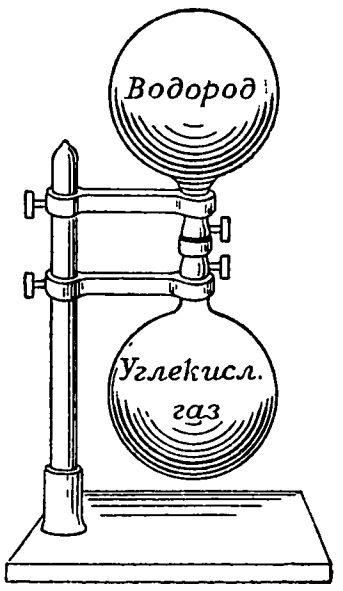


Рис. 51. Иллюстрация диффузии газов.

63. Движение молекул и способность газов беспредельно расширяться. Из всех рассмотренных нами свойств газов самым замечательным является, пожалуй, способность газов к неограниченному расширению. Благодаря этому свойству газов мы можем достигнуть большой степени разрежения с помощью воздушного насоса. Сколько бы воздуха ни перешло из приемника, оставшийся воздух сразу же расширится и заполнит весь сосуд. Это явление отлично объясняется движением молекул. Как бы быстро мы ни поднимали поршень воздушного насоса, воздух как будто бы моментально следует за ним Отсюда мы заключаем, что естественная скорость газовых молекул чрезвычайно велика.

64. Движение молекул и давление газа. Как объяснить давление газов на стенки содержащих их сосудов? Мы видели, что на уровне моря воздух давит на стенки комнаты с силой в 1 033-*г* на *кв. см.* В пневматических колесных шинах давление доходит до 7,5 *кг*, а в котлах локомотива даже до 20 *кг* на *кв. см.* И все же даже при таких давлениях мы можем быть уверены, что молекулы газа отделены друг от друга промежутками, большими по сравнению с диаметрами молекул. Ибо пар, конденсируясь в воду, сжимается в 1600 раз, а воздух, переходя в жидкое состояние, сжимается примерно в 800 раз. Эти факты сразу делаются понятными, если принять во внимание д в и ж е н и е молекул. Когда стену дома поливают уличным брандспойтом, частички воды оказывают непрерывное давление на стену. Точно также бесчисленные удары молекул газа о стенки сосуда создают, впечатление постоянной силы, давящей на эти стенки. Отсюда ясно, каким образом сосуды, содержащие только газ, могут противостоять огромному внешнему давлению, которому они, как известно, подвержены.

65. Объяснение закона Бойля. В предыдущей главе мы видели, что при увеличении плотности газа вдвое, при постоянной температуре, давление газа тоже увеличивается вдвое; при увеличении плотности втрое давление оказывается в три раза больше и т. д. Так говорит закон Бойля. Именно такую картину и следует ожидать, если считать, что давление на данную поверхность вызвано ударами громадного числа быстро движущихся молекул. Ибо с увеличением плотности вдвое удваивается число молекул в данном объеме, а это удваивает число ударов о стенки в секунду, т. е. удваивает давление.

Таким образом кинетическая теория газов очень просто объясняет закон Бойля.

66. Броуновское движение и движение молекул. Недавно удалось чрезвычайно простым и замечательным образом показать движение газовых молекул. Дело в том, что очень мелкие капельки масла, взвешенные в абсолютно неподвижном воздухе, сами не остаются в покое, а все время движутся и пляшут, как живые. В 1913 г. было окончательно доказано, что движение капелек, известное под названием Броуновского движения, непосредственно вызвано бомбардировкой капелек летящими молекулами газа. В каждый данный момент бомбардировка эта не во всех направлениях одинакова, и поэтому взвешенная частица, если она только достаточно мала, толкается то в одну, то в другую сторону, в зависимости от интенсивности бомбардировки в том или ином направлении. Нет ни малейшего сомнения, что движения капелек масла — копия с движения самих молекул, только молекулы, конечно, движутся гораздо более оживленно.

67. Скорости молекул. Зная вес *куб. см* воздуха при нормальных условиях и силу, с которой он давит на *кв. см* (а именно 1033 *г*), можно рассчитать скорость, которой должны обладать молекулы газа, чтобы ударами о стенки они могли такое давление произвести. Вычисление дает для молекул воздуха при нормальных условиях скорость примерно в 445 *м* в секунду, а для молекул водорода — громадную скорость в 1 700 *м* в секунду. Скорость вылетевшего снаряда редко превышает 800 *м* в секунду. Раз молекулы обладают такими скоростями, совершенно понятно, почему воздух распространяется моментально по всему пространству под поднимающимся поршнем воздушного насоса, и почему всякий газ всегда целиком заполняет весь содержащий его сосуд (см. ртутно-диффузионный воздушный насос, таблица против стр. 35).

68. Диффузия газов через пористые перегородки. Следующий опыт убедительно говорит в пользу только что высказанных соображений.

Закупорим простой стакан из неглазированной глины резиновой пробкой, в которую воткнута стеклянная трубка (см. рис. 52). Опустим эту трубку в сосуд с подкрашенной водой, а над пористым стаканом установим колокол, содержащий водород. Или же просто можно держать колокол так, как показано на рисунке, и пропускать под него светильный газ с помощью резиновой трубки, соединенной с газопроводом. В воде немедленно появятся пузырьки. Это показывает, что давление газа внутри стакана быстро возросло. Поднимем колокол, тогда стакан не будет уже окружен водородом. Вода сразу же начнет подниматься по трубке, что указывает на резкое понижение давления в пористом стакане.

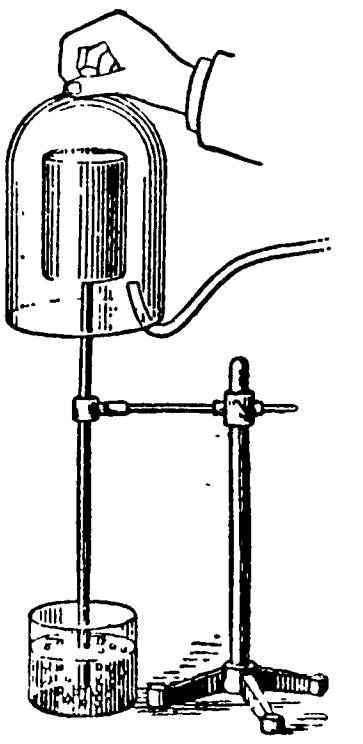


Рис. 52. Диффузия водорода через пористый сосуд.

Объясняется этот факт следующим образом. Мы видели, что молекулы водорода движутся примерно в 4 раза скорее молекул воздуха. Поэтому если вне стакана в каждом *куб. см* находится столько же молекул водорода, сколько внутри стакана имеется молекул воздуха в каждом *куб. см*, водородные молекулы будут ударять в наружные стенки в 4 раза чаще, чем молекулы воздуха ударяют во внутренние стенки. Значит, в каждый данный момент снаружи через мелкие дырочки

пористого материала в стакан проникает в 4 раза больше молекул, чем из стакана наружу уйдет молекул воздуха. Поэтому давление внутри стакана увеличивается. После удаления колокола, набравшийся в стакан водород начинает выходить наружу скорее, чем окружающий воздух проникает внутрь. Следовательно, давление в стакане понижается.

ДВИЖЕНИЕ МОЛЕКУЛ В ЖИДКОСТЯХ.

69. Движение молекул в жидкостях и испарение. В жидкостях, так же как и в газах, молекулы находятся в непрерывном движении. Это следует из хорошо знакомого нам факта испарения жидкостей.

Как известно, молекулы жидкости, налитой в открытый сосуд, все время выскакивают из жидкости и переходят в пространство над ней. Полное исчезновение жидкости из сосуда — только вопрос времени. Каким же образом молекулы жидкости могут выйти из нее? Трудно этому найти объяснение, если только не допустить, что молекулы, находясь в жидкости, движутся. В то же время при таком допущении процесс испарения становится совершенно ясным. Быстро несущиеся молекулы жидкости сталкиваются друг с другом, и от времени до времени та или иная молекула приобретает скорость, сильно превышающую среднюю скорость молекул. Благодаря исключительной скорости такая молекула преодолевает притяжение соседних молекул и улетает в пространство над жидкостью.

70. Движение молекул и диффузия жидкостей. Одним из самых убедительных доводов в пользу движения молекул в газах является, как известно, диффузия газов. В жидкостях наблюдается точно то же самое явление.

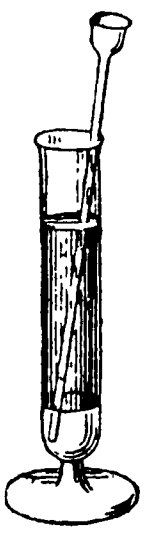


Рис. 53. Диффузия жидкости.

Р столчем в порошок несколько кусочков синего лакмуса и дадим ему раствориться в воде. Часть раствора вольем в высокий стеклянный цилиндр и прибавим туда несколько капель нашатырного спирта. К остальному лакмусовому раствору прибавим 1 — 2 *куб. см* азотной кислоты, — от этого он покраснеет. Охладив немного подкисленный раствор, введем его через воронку в нижнюю часть цилиндра (см. рис. 53). — Даже при абсолютной неподвижности цилиндра красная окраска в течение нескольких часов сильно продвинется кверху. Это значит, что молекулы кислоты постепенно распространились вверх.

Отсюда ясно, что молекулы жидкости должны обладать способностью двигаться самостоятельно и независимо.

Действительно, все доводы в пользу подвижности газовых молекул в равной мере приложимы и к молекулам жидкостей. В жидкостях можно наблюдать и Броуновское движение; правда, оно здесь настолько слабо, что его удается разглядеть только в самые мощные микроскопы. Смешаем немножко нерастворимого кармина с несколькими каплями воды. Мы увидим Броуновское движение в микроскоп, увеличивающий в 400 раз и больше.

ДВИЖЕНИЕ МОЛЕКУЛ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ.

71. Движение молекул и диффузия твердых тел. В последнее время было обнаружено интересное явление: если наложить слой

свинца на слой золота, то через определенный промежуток времени во всей массе свинца можно будет наблюдать присутствие молекул золота. Такого рода диффузия твердых тел при нормальной температуре известна только у этих двух металлов. Однако при более высоких температурах (напр., при 500° С) у всех металлов наблюдается диффузия, и притом удивительно резко выраженная. Нам известны твердые тела, молекулы которых улетают с поверхности их. Таковы, например, камфора или нафталин: запах их чувствуется на значительном расстоянии.

Итак, молекулы твердых тел также находятся в движении. Это не менее очевидно, чем существование молекулярных движений в жидкостях.

72. Три состояния материи. Согласно современным воззрениям, молекулы всякого вещества очень быстро движутся, однако движения эти различны, в зависимости от состояния вещества. Так, напр., в твердых телах молекулы, по всей вероятности, с большой быстротой колеблются около некоторых определенных точек. Благодаря притяжению соседних молекул, т. е. благодаря силам сцепления (см. § 113), молекулы все время занимают, примерно, то же самое положение относительно других молекул данного тела. Однако существование диффузии говорит о том, что в некоторых случаях молекулы твердых тел могут оторваться от своих соседей. В жидкостях дело обстоит иначе. Молекулы там находятся на тех же расстояниях друг от друга, что и в твердых телах. Но они с абсолютной легкостью скользят одна мимо другой и не имеют поэтому никакого определенного положения. Поэтому жидкость без малейшего сопротивления принимает форму содержащего ее сосуда. В газах молекулы отстоят сравнительно далеко друг от друга; вспомним, что 1 *куб. см* воды, превращенной в пар, занимает объем примерно в 1 600 *куб. см*. Кроме того, между молекулами газа не действуют почти никакие силы сцепления, отсюда способность газов к неограниченному расширению.

Резюме. **В настоящее время всеми принимается теория молекулярного строения материи.**

Доказательства существования молекулярных движений (кинетическая теория материи): диффузия, неограниченное расширение газов, Броуновское движение и испарение жидкостей и твердых тел.

Закон Бойля становится понятным, если считать, что давление газа при заданной температуре определяется числом молекулярных ударов, приходящихся на единицу площади в единицу времени.

Легкий газ диффундирует быстрее, чем тяжелый, в виду бо́льших скоростей его более легких молекул.

ГЛАВА V.

ДВИЖЕНИЕ И СИЛЫ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ СИЛ.

73. Различие между грамм-массой и грамм-силой. Когда держишь на вытянутой руке массу в 1 *г*, руку тянет вниз с некоторой силой. Если вместо 1 *г* положить 50 000 *г*, руку потянет вниз так сильно, что невозможно будет удержать ее в вытянутом поло-

жении. Мы объясняем это явление земным притяжением, действующим на массу, лежащую в нашей руке.

Силой в 1 *г* мы называем силу, с которой земное притяжение действует на массу в 1 *г* на поверхности земли.

К несчастью, в обыденной жизни мы часто смешиваем понятия массы и силы, и одним и тем же словом «грамм» обозначаем в одних случаях — определенное количество материи, а в других — действие земного притяжения на это количество материи. Между тем различие этих двух понятий совершенно очевидно. Масса тела остается всегда одной и той же, в каком бы месте вселенной оно ни находилось. А действие земного притяжения на данное тело уменьшается по мере удаления от поверхности земли.

Во избежание путаницы в дальнейшем мы будем называть просто «граммом» только количество материи (т. е. массу). Действие же земного притяжения на эту массу мы всегда будем называть полностью «грамм-сила».

74. Измерение сил. Для точного сравнения действия земного притяжения на различные массы наше мускульное ощущение является очень ненадежным критерием. Вот почему для этого пользуются пружинными весами. Дело в том, что действие земного притяжения на 1 *г* массы растянет данную пружину на некоторую длину *ab* (рис. 54); сила земного притяжения, действующая на 2 или 3 грамма массы, сильнее растянет ту же пружину: растяжение ее будет равно *ac* или *ad*; и т. д. Можно проградуировать пружинные весы (рис. 55) так, чтобы они служили мерой приложенной к ним силы, независимо от ее величины. Для этого позади стрелки весов укрепляют шкалу с делениями. Они соответствуют положениям стрелки при растяжениях пружины тяжестью различных масс.

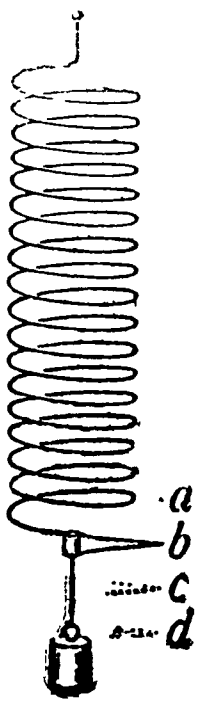


Рис. 54. Притяжение сил.

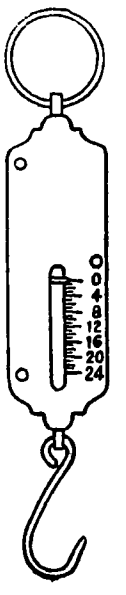


Рис. 55. Пружинные весы.

Пусть, затем, человек растягивает весы так, что стрелка оказывается против значка, соответствующего растяжению пружины тяжестью 2 *г* (или 3 *г*) массы. Тогда говорят, что человек приложил силу в 2 или 3 *г*. Таким образом, пружинные весы являются инструментом для измерения сил.

75. Сила грамм несколько различна в разных местностях. С помощью пружинных весов легко можно проверить высказанное выше утверждение, что сила земного притяжения ослабевает по мере удаления от земной поверхности. Действительно, оказывается, что на высоких горах любая данная масса производит меньшее растяжение пружинных весов, чем на уровне моря. Наконец, даже при простом передвижении по земной поверхности растяжение это не остается неизменным. Напр., в Чикаго оно, примерно, на 1/1000 меньше, чем в Париже, а близ экватора оно на 5/1000 меньше, чем около по-

люса. Это зависит отчасти от вращения земли, отчасти же от ее формы. Земля не является идеальным шаром и поэтому, путешествуя от экватора к полюсу, мы все более и более приближаемся к центру земли. Таким образом, вес массы в 1 *г* не есть вполне точно определенная единица силы.

СЛОЖЕНИЕ СИЛ.

76. Графическое изображение силы. Сила вполне определяется заданием величины, направления и точки приложения. В то же время прямая линия тоже характеризуется ее длиной, направлением и начальной точкой. Следовательно, можно, очевидно, изображать силы прямыми линиями. Положим, что в точке A приложена сила в 4 *кг*, направленная на восток. Графически это выражается так: из точки A вправо проводят прямую, длина которой равна 8 единицам. Длина, направление и начальная точка этой прямой изображают величину, направление и точку приложения силы.

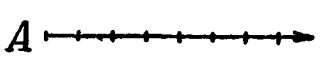


Рис. 56. Направление равнодействующей двух взаимно перпендикулярных и равных величин сил.

77. Равнодействующая двух сил, направленных по одной прямой. Равнодействующей двух сил называется сила, которая одна производит на всякое тело такое же действие, как обе эти силы вместе.

Прикрепим к маленькому кольцу две пары пружинных весов и будем тянуть их в одном и том же направлении, пока стрелка одних весов не покажет силу в 10 *г*, а стрелка других силу в 5 *г*. Прикрепим затем к этой же точке кольца 3-ю пару пружинных весов и потянем ее в прямо противоположном направлении. В случае равновесия 3-я пара весов покажет ровно 15 *г*. Т. е. равнодействующая двух одинаково направленных параллельных сил равна их сумме.

Точно также равнодействующая двух противоположно направленных сил, приложенных к одной точке, равна разности этих сил и направлена в сторону большей силы.

78. Равнодействующая сил, направленных под углом друг к другу. Положим, что на тело, находящееся в A, действуют две силы: одна, равная 5 *кг*, и направленная к востоку (AC на рис. 57), и другая, направленная к северу и тоже равная 5 *кг* (AB на рис.). Ясно, что обе эти силы вместе производят на тело в A такое же действие, как одна сила, направленная по биссектрисе угла BAC, т. е. по прямой AR. Таким образом, эта прямая дает и направление и точку приложения равнодействующей сил AC и AB.

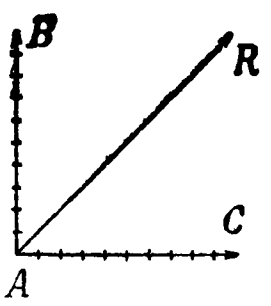


Рис. 57.

79. Правило параллелограмма. Когда обе составляющие силы различны, как, напр., на рис. 58, равнодействующая проходит ближе к большей силе. Следующий опыт покажет нам соотношение между равнодействующей и составляющими силами.

Повесим две пары пружинных весов на гвозди B и C, вбитые в верхнюю перекладину грифельной доски (рис. 59); соединим крючки весов веревкой

и, приблизительно, посередине этой веревки повесим некоторый груз W. Ясно, что груз W поддерживается не силами пружин E и F, а их равнодействующей. Очевидно, равнодействующая эта направлена вертикально вверх, так как она должна быть равной и противоположной весу W. Зарисуем на доске направления OA и OD и отложим на них отрезки Oa и Ob, содержащие столько единиц длины, сколько единиц силы показывают весы E и F. Точно также проведем из O вертикальный отрезок OR, изображающий силу, поддерживающую груз W. Согласно сказанному выше, OR изображает равнодействующую. Построим теперь на отрезках Oa и Ob параллелограммы. Мы увидим, что проведенный отрезок OR является диагональю этого параллелограма.

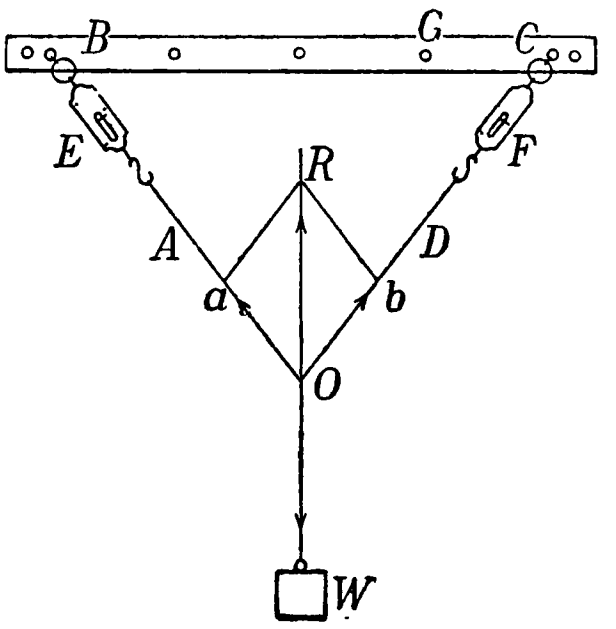


Рис. 59. Опытное доказательство закона параллелограмма.

Итак, для того чтобы графическим путем найти равнодействующую двух сил, действующую на точку под углом, надо: 1) начертить отрезки, изображающие данные силы, 2) построить на них параллелограмм и 3) из точки приложения сил провести диагональ. Эта диагональ даст графическое изображение равнодействующей. Ее величина, направление и точки приложения определяют величину, направление и точку приложения равнодействующей.

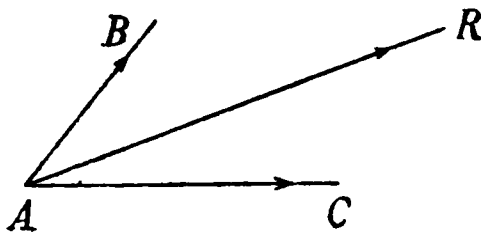


Рис. 58. Равнодействующая проходит ближе к большей силе.

80. Составляющие сил. Положим, что сила действует на тело в таком направлении, в котором тело не может свободно передвигаться. Ясно, что в этом случае действие силы проявится не только в движении тела. Пусть, например, к каретке, двигающейся вдоль колеи (рис. 60), приложена сила в направлении OR. Очевидно, сила OR вызовет два совершенно различных эффекта: с одной стороны, она заставит двигаться каретку вдоль колеи, с другой — прижмет каретку вниз к колее. Такие два эффекта могут быть вызваны действием двух сил, направленных по OA и OB. Мы называем составляющей силы OR в направлении OA силу, действующую в направлении OA и способную вызвать такое же движение каретки по колее, как сила OR. Точно также составляющей силы OR в направлении OB мы называем силу, действующую в направлении OB и способную произвести такое же давление на колею, как и сила OR.

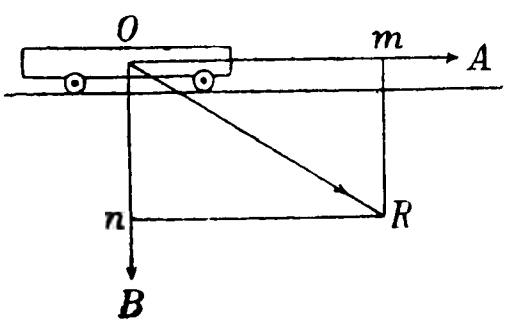


Рис. 60. Составляющие силы.

Короче говоря, составляющей данной силы в данном направлении называется эффективная величина этой силы в этом направлении.

81. Величина составляющей силы в данном направлении. Согласно только что данному определению «составляющей», действие на каретку, произведенное обеими силами, направленными вдоль прямых OA и OB, должно быть в точности равным действию силы OR. Значит, величины этих сил можно изобразить в виде сторон

параллелограмма, для которых OR является диагональю. Для доказательства этого вспомним § 79. Там было показано, что всякая сила, производящая такой же эффект, как две других силы вместе, может быть представлена диагональю параллелограмма, построенного на этих двух силах, как сторонах.

Следовательно, обратно, две силы, эквивалентные по своему совместному действию одной силе, можно изобразить в виде сторон параллелограмма, диагональ которого изображает данную силу. Отсюда следующее правило:

Для того чтобы найти составляющую силы в данном направлении, изобразим эту силу прямой линией; на этой прямой, как на диагонали, построим параллелограмм, стороны которого соответственно параллельны и перпендикулярны к направлению искомой составляющей. Длиной стороны, параллельной данному направлению, и определяется величина искомой составляющей.

Так, например, на рис. 60 прямая Om изображает составляющую OR в направлении OA, а прямая On — составляющую OR в направлении OB.

Другой пример: мальчик тянет сани (рис. 61); сила, толкающая сани вперед, изображена отрезком Om. Она равна всего 4,6 *кг*, а не

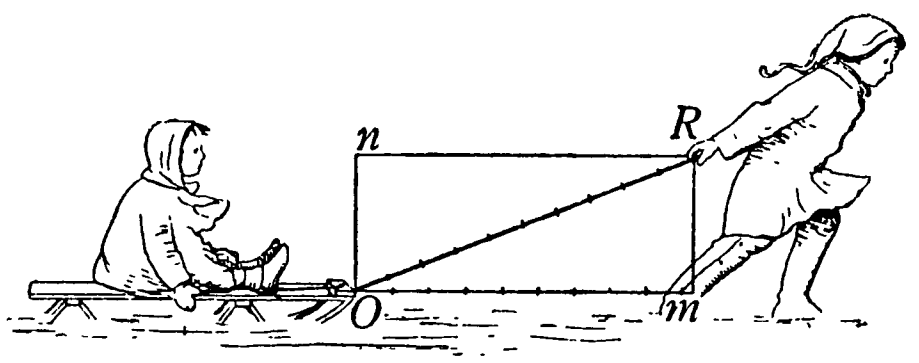


Рис. 61. Горизонтальная составляющая силы, приложенной к санкам.

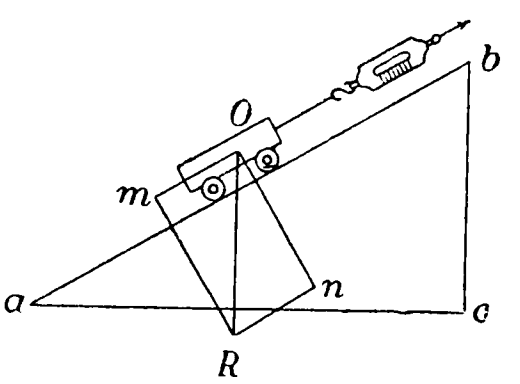


Рис. 62. Составляющая веса каретки, параллельная наклонной плоскости.

5 *кг*. Составляющая, стремящаяся приподнять сани, изображена отрезком On.

Проверим на опыте рассуждения предыдущего параграфа. Поместим вагонетку на наклонной плоскости (рис. 62), высота которой bc равна половине ее длины ac. Тогда сила, действующая на вагонетку, — это ее собственный вес. Он тянет вагонетку вниз. Изобразим эту силу прямой OR. Тогда, согласно данному выше правилу разложения сил, отрезок om изображает силу, тянущую вагонетку по наклонной плоскости, а отрезок on — силу, производящую давление на плоскость. Треугольник Rom подобен треугольнику abc, ибо $\angle moR = \angle abc$, $\angle Rmo = \angle acb$, $\angle oRm = \angle bac$. Отсюда имеем:

$$\frac{Om}{oR} = \frac{bc}{ab},$$

т. е., в данном случае в виду равенства $ab = 2\ bc$, получаем:

$$om = \frac{oR}{2}$$

Значит, чтобы помешать вагонетке катиться вниз по наклонной плоскости, надо приложить силу, равную половине веса вагонетки. Для проверки этого вывода взвесим вагонетку на пружинных весах, а затем поместим ее на наклонной плоскости, как показано на рисунке. Если трения нет или оно мало, весы покажут силу, как раз равную половине веса вагонетки.

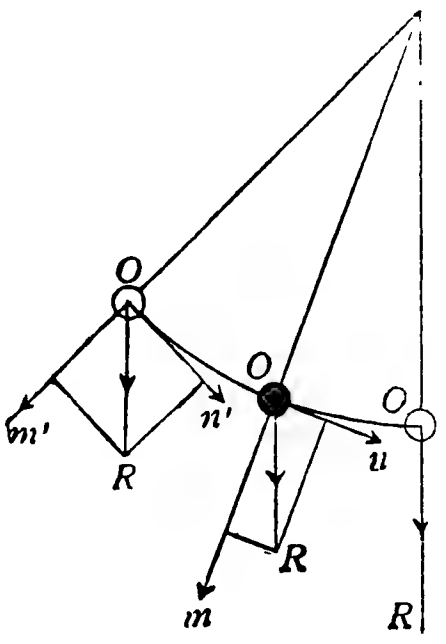
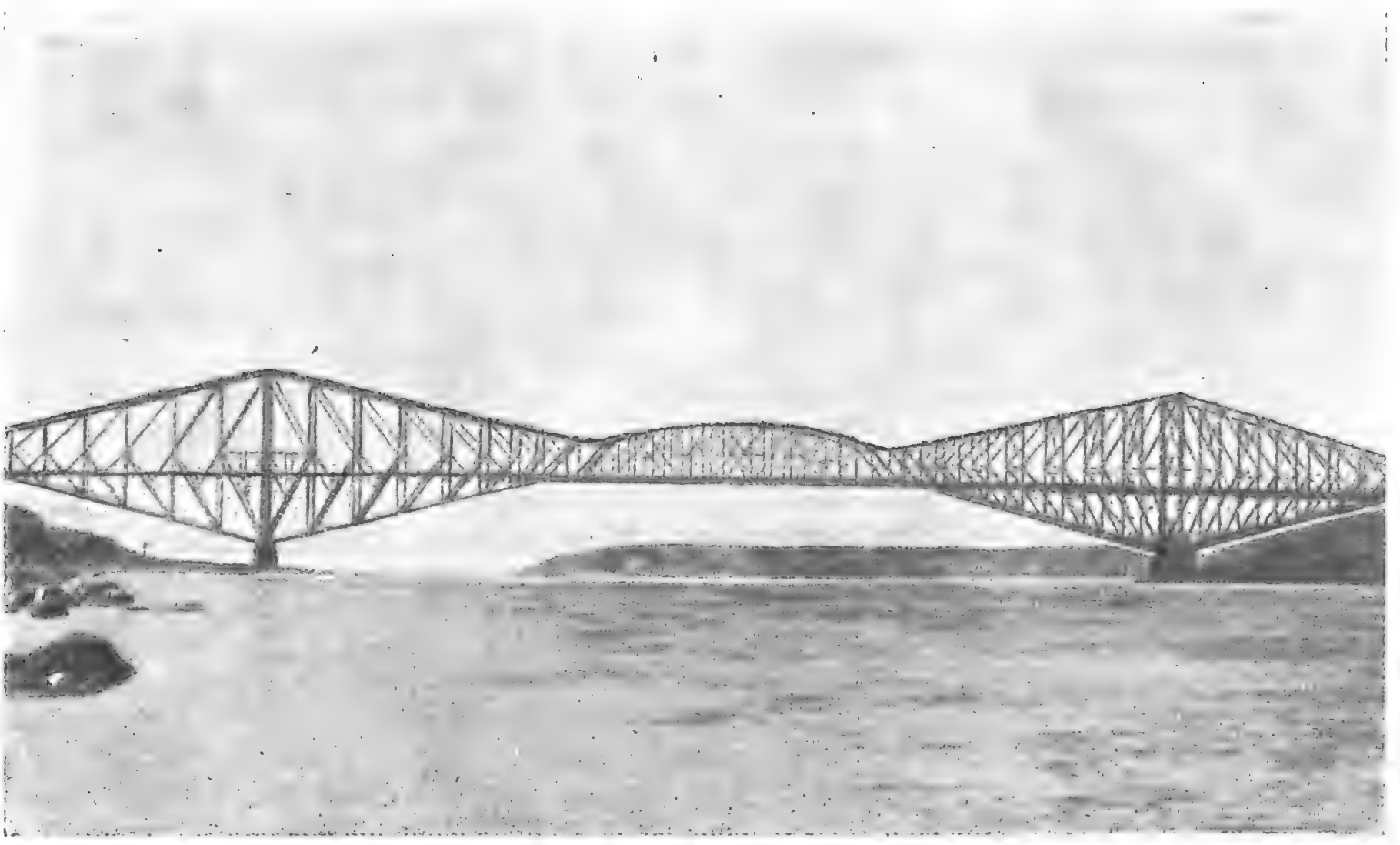


Рис. 63. Сила, действующая на маятник, выведенный из положения равновесия.

Соотношение $\frac{Om}{oR} = \frac{bc}{ab}$ позволяет установить следующее правило для нахождения силы, способной помешать телу двигаться по наклонной плоскости:

Сила, необходимая для удержания тела в покое на наклонной плоскости, так же относится к весу тела, как высота плоскости к ее длине.

82. Составляющая силы тяжести, вызывающая колебание маятника. Выведем маятник из положения равновесия (рис. 63). На чечевицу его действует сила ее собственного веса, направленная вертикально вниз. Изобразим ее отрезком OR. Составляющая этой силы в направлении свободного движения маятника есть On (или On'), а составляющая перпендикулярная к ней — Om (или Om'). Вторая составляющая только натягивает нить и давит на точку привеса. Качание же маятника вызвано только первой составляющей. Рис. 63 показывает, что эта составляющая растет по мере удаления маятника от положения равновесия. Когда чечевица



БОЛЬШОЙ КОНСОЛЬНЫЙ МОСТ В КВЕБЕКЕ.

Ширина среднего пролета этого моста достигает 600 *м* Это самый длинный консольный мост в мире; он на 30 *м* длиннее знаменитого фортского моста в Шотландии. Центральный висячий пролет имеет 213 *м* в длину и весит 5 600 тонн. Стоимость постройки этого моста — около 17 000 0000 долларов. На него употреблено около 3 000 000 заклепок.

маятника находится прямо под точкой подвеса, эта составляющая равна нулю. Поэтому маятник может длительно находиться в состоянии покоя только, если его чечевица находится прямо под точкой привеса.

83. Законы маятника. Законы движения маятника можно получить из следующих опытов:

Возьмем два маятника совершенно олинаковой длины (около 1 *м*), но с различными чечевицами; пусть у олного чечевица свинцовая, а у другого — стальная или стеклянная. Вывелем их из положения равновесия и отпустим в один и тот же момент. Измерение времен колебания маятника даст нам первый закон, а именно:

1. Время колебания маятников одинаковой длины при малых размахах не зависит от материала чечевиц.

Пусть теперь один маятник описывает дугу в 2 *см*, а другой в 5 *см*. Тогда мы найдем второй закон. А именно:

2. Время колебания маятника при малых размерах не зависит от амплитуды колебаний.

Одновременно с маятниками рассмотренной длины заставим колебаться еще лва маятника; пусть один будет в 4 раза, а другой в 9 раз короче первого маятника.

Окажется, что пока длинный маятник делает одно колебание, другие делают соответственно 2 и 3 колебания. Отсюда третий закон:

3. Время колебания маятника прямо пропорционально корню квадратному из его длины.

Резюме. **Масса грамм есть определенное количество материи. Оно всегда остается одним и тем же. В то же время грамм-сила есть действие земного притяжения на массу грамм на уровне моря. Грамм-сила немного меняется в зависимости от положения на земной поверхности.**

Равнодействующей нескольких сил называется сила, производящая на всякое тело такое же действие, как эти несколько сил вместе. Правила для нахождения равнодействующей выведены в §§ 77 — 79.

Составляющей силы в данном направлении называют эффективную величину силы в данном направлении. Правила нахождения составляющих выведены в § 81. Колебание маятника вызвано составляющей его веса в направлении его движения.

Закон относительно пропорциональности времени колебаний и корня квадратного из длины маятника можно выразить следующей формулой:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{\sqrt{l_1}}{\sqrt{l_2}}$$

Вопросы и задачи.

1. Мальчик может грести со скоростью 5 *км* в час в тихой воде. С какой скоростью двигалась бы его лодка по реке, скорость течения которой 2 *км* в час, при движении по течению? против течения?

2. Ветер гонит пароход к востоку с силой, которая могла бы двигать его со скоростью 12 *км* в час; а пропеллер парохода толкает его к югу с силой, могушей двигать его со скоростью 15 *км* в час. С какой скоростью этот пароход будет двигаться на самом деле?

Сделайте соответствующий чертеж.

3. Изобразите графически силу в 15 *кг*, действующую в юго-восточном направлении, и силу в 25 *кг*, направленную на юго-запад. Какова будет величина равнодействующей? Каково, приблизительно, ее направление?

4. Аэроплан может в спокойном воздухе делать 120 *км* в час. Положим, что он летит при ветре, дующем к востоку, скорость которого 60 *км* в час. Найдите фактическую скорость аэроплана и направление его полета, когда он сам направлен к северу; востоку; югу; западу.

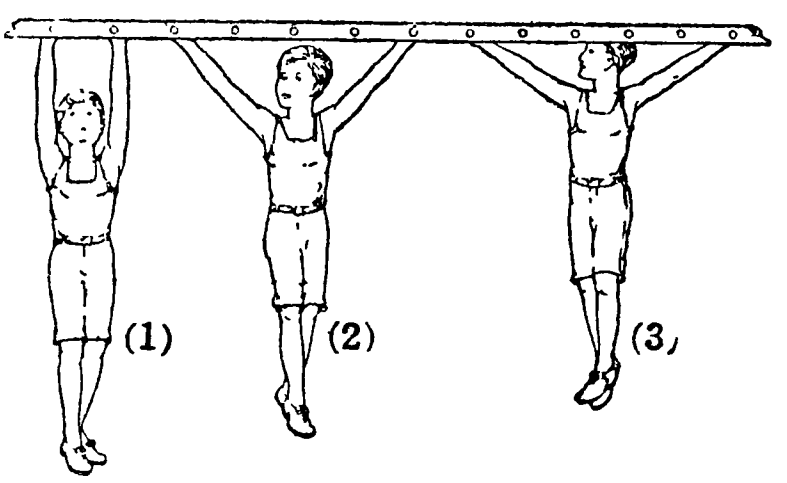


Рис. 64.

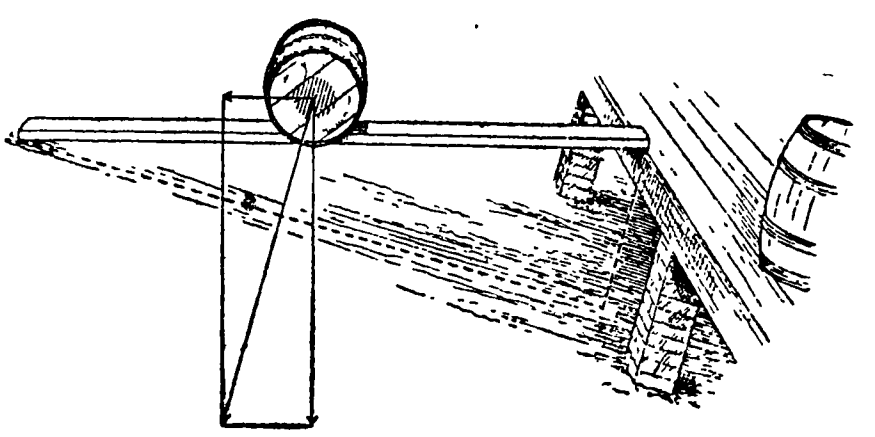


Рис. 65. Сила, потребная для того, чтобы помешать бочке скатываться вниз по наклонной плоскости.

5. Баржа стоит на якоре посреди реки во время шторма. Ветер дует к востоку с силой 1 500 *кг*; прилив толкает баржу к северу с силой в 2 000 *кг*. Каковы величина и направление натяжения якорной цепи?

6. Концы веревки, длина которой 3 *м*, закреплены на потолке так, что расстояние между концами 2,5 *м*. В середине веревки подвешен груз в 10 *кг*. Найдите натяжение каждой половины веревки.

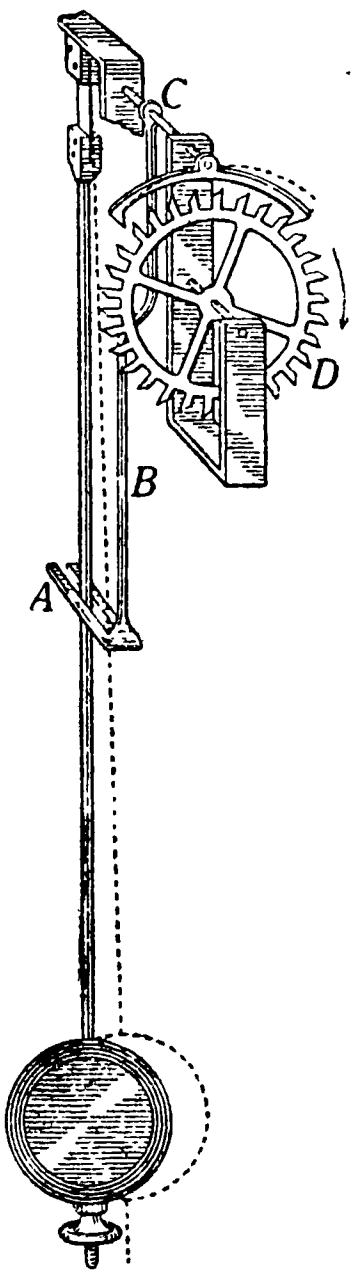


Рис. 66.

7. Чтобы вести нагруженные сани по ровному снежному пути необходима горизонтальная сила в 12 *кг*. Пусть длина веревки от саней равна 3 *м*. Какое усилие надо приложить к веревке, чтобы двигать сани, если один конец веревки (1) на 1 *м* выше другого и (2) на 1,5 *м* выше другого?

8. Ребенок, весящий 50 *кг*, сидит на качелях. Когда качели выведены из вертикального положения, их может удержать в равновесии горизонтальная сила в 20 *кг*. Найдите, каково натяжение обеих веревок качелей.

9. Картина, весящая 10 *кг*, висит на веревке, части которой составляют угол в 120°. Найдите натяжение каждой части веревки.

10. Если бы веревка в задаче 10 была согнута под углом в 90°, то каково было бы натяжение в каждой части веревки?

11. На шведской стенке висят три мальчика, все трое весящие по 50 *кг* (см. рис. 64). 1) У одного руки параллельны, 2) у другого руки составляют угол в 90°, 3) у третьего — в 120°. Найдите, каково натяжение рук мальчиков во всех трех случаях.

12. Якорный канат воздушного змея составляет с поверхностью земли 60°. Если подъемная сила змея 500 *кг*, то каково натяжение каната и с какой силой дует ветер, действующий на змей горизонтально?

13. Бочка, изображенная на рис. 65, весит 100 *кг*. Чтобы удержать ее на месте, человек должен прилагать силу, параллельную доске и проходящую через центр бочки. Какова величина этой силы, если длина доски 3 *м*, а высота платформы 1 *м*?

14. Длина маятника, делающего в Нью-Йорке одно колебание в секунду, равна 99,3 *см*. Объясните, почему маятник с этим же самым временем колебания имеет на экваторе длину 99,1 *см*, а на полюсе — 99,5 *см*.

15. Какова длина маятника с временем колебания, равным 3 сек.? 2 сек.? $^1/_2$ сек.? $^1/_3$ сек.?

16. На рис. 66 изображен часовой маятник и сторожок часов. Колесо D движется посредством гирь или пружины в направлении стрелок. Зубцы колес сообщают маятнику легкие толчки, мешающие ему остановиться. Объясните, каким образом длина маятника определяет быстроту хода часов.

17. Длины 5 маятников находятся в отношениях: $1 : 4 : 9 : \frac{1}{4} : \frac{1}{9}$. В каких отношениях находятся их времена колебаний?

ТЯГОТЕНИЕ.

84. Закон Ньютона о всемирном тяготении. Почему земля притягивает к себе все тела, находящиеся на ее поверхности? Какая сила заставляет луну и планеты двигаться по их орбите вокруг солнца?

Для объяснения этих явлений Исаак Ньютон (1642—1727) первый высказал закон, известный в настоящее время как закон всемирного тяготения. Этот закон говорит, что, во-первых, всякое тело во вселенной притягивает к себе всякое другое тело с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояний между телами. Это значит, что, при увеличении расстояния между телами вдвое, сила притяжения становится в четыре раза меньшей; при увеличении расстояния в 3, 4 или 5 раз, сила делается в 8, 16 или 25 раз меньше; и т. д.

Далее, в законе всемирного тяготения содержится утверждение: при постоянном расстоянии между телами сила, с которой одно тело притягивает другое, пропорциональна произведению масс обоих тел. Так, например, земля, как известно, притягивает 3 *куб. см* воды с силой в 3 раза большей, чем она притягивает 1 *куб. см* воды, т. е. с силой в *3 г*. Далее. На основании данных астрономии, мы знаем, что если бы масса земли увеличилась вдвое, а диаметр ее остался бы неизменным, земля притягивала бы 3 *куб. см* воды с вдвое большей силой, чем в настоящее время, т. е. с силой в 6 *г* (увеличение массы одного из притягиваемых тел в 3, а другого в 2 раза дает увеличение силы притяжения между ними в 2×3, т. е. в 6 раз).

Итак, короче говоря, закон Ньютона о всемирном тяготении гласит следующим образом:

Всякие два тела во вселенной притягивают друг друга с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.

Две массы, в 1 *г* каждая, находящиеся на расстоянии 1 *см*, притягивают друг друга, приблизительно, с силой в $\frac{1}{15\,000\,000\,000}$ *г*. Массы солнца и земли так велики, что даже при громадном расстоянии в 150 000 000 *км* они притягивают друг друга с силой, примерно, равной 4 000 000 000 000 000 000 *т*. Для того чтобы заменить тяготение и удерживать солнце и землю на их теперешнем

расстоянии друг от друга, понадобился бы солидный стержень из лучшего сорта стали, длиной в 150 000 000 *км* и диаметром в 8 000 *км*. Тело, весящее на земле 50 *кг*, весило бы на солнце около 1 350 *кг*. На земле свободно падающее тело проходит в 1-ю секунду 4,9 *м*. На солнце оно прошло бы в первую секунду в 27 раз большее расстояние, т. е. 132,3 *м*. На луне мы весили бы в 6 раз меньше чем на земле; мы могли бы подпрыгнуть в 6 раз выше и падали бы в 6 раз медленнее чем на земле.

85. Изменение силы тяжести при подъеме над земной поверхностью. Тело однородной плотности, имеющее форму сферы, притягивает внешние тела так, как будто бы вся масса тела была сосредоточена в его центре. Расстояние от поверхности земли до ее центра — около 6 300 *км*. Значит, по закону Ньютона, земля притягивает тело, находящееся на 6 300 *км* над ее поверхностью, с силой в 4 раза меньшей, чем если бы это тело находилось на ее поверхности. Отсюда ясно, следует, что при подъеме тела на несколько метров или даже на несколько километров над поверхностью земли уменьшение в его весе должно быть весьма незначительным: несколько метров и километров составляют очень малую часть от 6 300 *км*. Например, на вершине горы высотою в 6,5 *км*, масса в 1 000 *г* притягивается землей с силой в 998, а не в 1 000 *г*.

86. Центр тяжести. Из закона всемирного тяготения следует, что каждая частица тела, находящаяся на земной поверхности, притягивается землей. Совершенно ясно, что сумма всех этих «частичных» притяжений должна быть равной общему притяжению всего тела. С другой стороны, у всякого тела всегда возможно найти точку, к которой достаточно приложить силу, по величине равную весу тела и направленную кверху, чтобы тело в любом положении оставалось в покое. Эта точка называется центром тяжести тела. Приложенная к центру тяжести сила полностью уравновешивает действие земного притяжения на тело. Следовательно, эта сила равна и противоположна равнодействующей всех отдельных мелких притяжений, оказываемых землей на каждую частичку тела. Поэтому можно определить центр тяжести как точку приложения равнодействующей всех мелких сил, тянущих отдельные частички тела вниз вследствие земного притяжения; другими словами, центр тяжести тела — это точка, в которой как будто бы сосредоточен весь вес тела. Поэтому земное притяжение на тело никогда не рассматривают как сумму множества мелких сил, а всегда прямо как одну силу F (рис. 67), равную весу тела и приложенную к его центру тяжести G. Отсюда ясно, что под влиянием земного притяжения всякое тело стремится принять такое положение, при котором его центр тяжести находится возможно ниже.

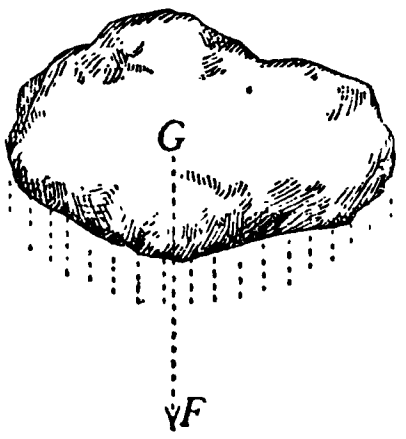


Рис. 67. Центр тяжести тела неправильной формы.

87. Нахождение центра тяжести опытным путем. Из определения

центра тяжести можно вывести наиболее простой метод нахождения центра тяжести всякого плоского тела, вроде изображенного на рис. 67. Для этого нужно только подыскать какое-нибудь острие, на котором можно данное тело удержать в равновесии.

Возьмем, например, цинковую пластинку неправильной формы и уравновесим ее на острии карандаша или булавки. Затем проделаем маленькую дырочку в пластинке в точке, где приходится острие. Через эту дырочку проткнем иголку. Если держать иголку горизонтально, пластинка будет в равновесии, как бы мы ее ни повернули.

Есть и другой способ найти центр тяжести такой пластинки. Проделаем в ней дырочку вблизи одного из краев напр., в точке b (рис. 68). Воткнем туда булавку так, чтобы пластинка держалась на ней. Подвесим на булавке свинцовый шнур с гирькой на конце и начертим на пластинке прямую bn, параллельную шнуру и находящуюся непосредственно за ним. Затем подвесим пластинку в другой точке a и точно так же проведем прямую am. Мы увидим, что центр тяжести цинковой пластинки будет лежать на точке пересечения прямых ln и am.

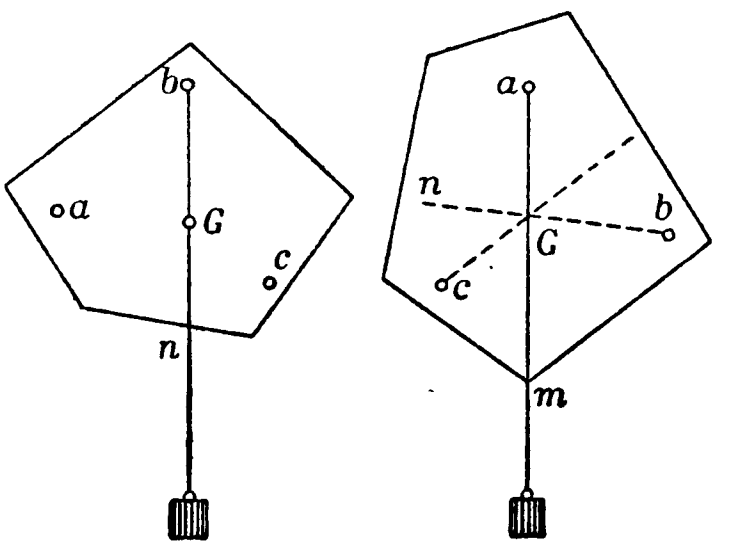


Рис. 68. Нахождение центра тяжести.

Действие земного притяжения на тело, как было показано, можно рассматривать как действие одной силы, приложенной к центру тяжести тела. Поэтому висящее тело (напр. цинковая пластинка) может оставаться в покое только тогда, когда его центр тяжести находится непосредственно под точкой подвеса (см. § 86). Поэтому центр тяжести пластинки должен находиться в одной из точек прямой am. По той же причине он должен лежать и на прямой bn. Единственная точка, лежащая одновременно и на прямой bn и am, — это их точка пересечения g. Итак, центр тяжести тела находится в точке пересечения двух любых вертикальных прямых, проведенных через две различные точки подвеса.

88. Устойчивое равновесие. Говорят, что тело находится в состоянии устойчивого равновесия, если, будучи слегка сдвинуто или повернуто, оно стремится вернуться в это состояние. Примеров тел, находящихся в устойчивом равновесии, — множество. Таковы, напр., маятник, стул, куб, покоящийся на одной из его сторон, конус, покоящийся на своем основании, лодка, плывущая в спокойной воде.

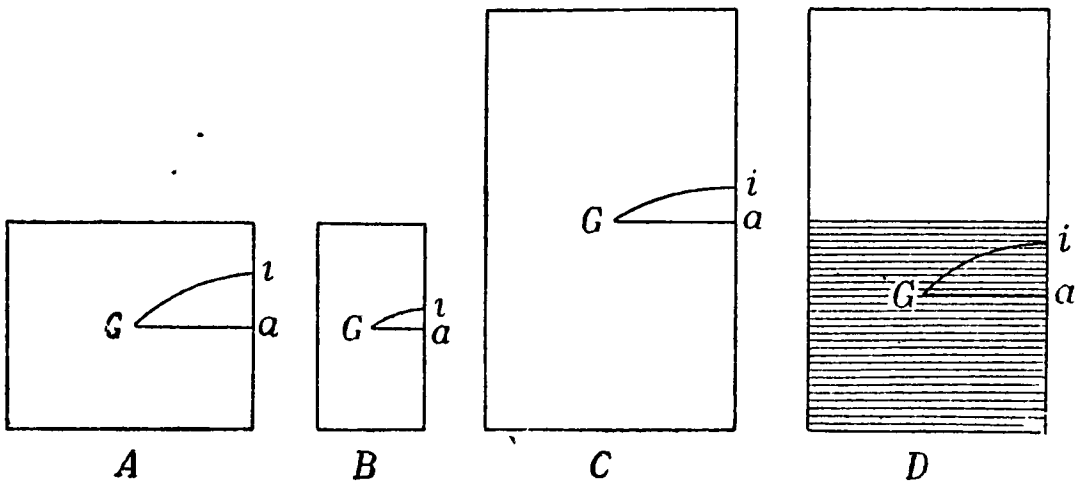


Рис. 69. Различные степени устойчивости.

Вообще, тело находится в устойчивом равновесии, если при всяком легком толчке его

центр тяжести стремится приподняться. Так, например, на рис. 69 все тела A, B, C, D находятся в устойчивом равновесии; чтобы опрокинуть любое из них, надо поднять его центр тяжести G на высоту ai. При одинаковых весах самым устойчивым будет тело, у которого ai — наибольшее.

При одинаковых высотах ai наиболее устойчивым будет самое тяжелое тело.

При постройке консольных мостов с фермами из сплошных клепаных балок вроде громадного моста через реку св. Лаврентия в Квебеке (см. стр. 58), инженеры строят арки так, чтобы их центры тяжести все время приходились на быках, пока обе части моста не встретятся в центре или не приблизятся настолько, чтобы они могли сдержать центральный пролет.

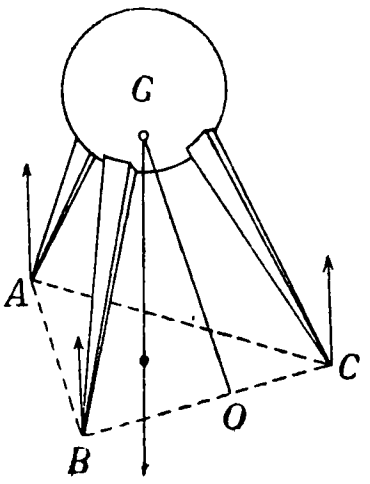


Рис. 70. Тело находящееся в устойчивом равновесии.

Условие устойчивого равновесия для тел, покоящихся на горизонтальной плоскости, состоит в следующем: вертикальная прямая, проходящая через центр тяжести, должна пройти внутри основания тела. При этом основанием тела называется полигон, соединяющий точки соприкосновения тела с горизонтальной плоскостью, напр., ABC на рис. 70. Когда это условие выполнено, малейшее смещение тела, очевидно, поднимет центр тяжести вдоль дуги, радиусом которой служит OG. Если вертикальная прямая, проведенная через центр тяжести проходит вне основания тела, как на рис. 71, тело падает, т. е. его центр тяжести опускается.

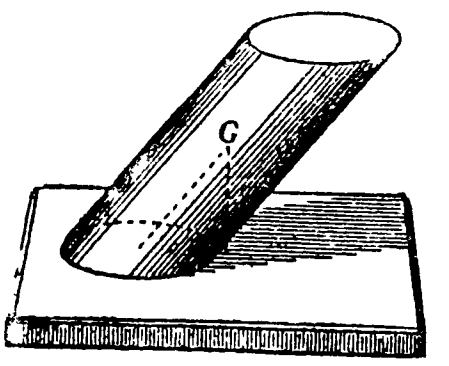


Рис. 71. Тело, находящееся в равновесии.

89. Безразличное и неустойчивое равновесие. Говорят, что тело находится в безразличном равновесии, если при легком толчке оно не стремится ни вернуться в положение равновесия, ни удалиться от него. Примеры тел в безразличном равновесии: сферический мяч, лежащий на гладкой плоскости, конус, лежащий на боку, колесо, могущее свободно вращаться вокруг неподвижной оси, проходящей через его центр, а также всякое тело, покоящееся на своем центре тяжести.

Вообще говоря, тело находится в безразличном равновесии, если при легком вращении его центр тяжести не поднимается и не опускается.

Тело находится в неустойчивом равновесии, если достаточно легкого толчка, чтобы оно стремилось удалиться от своего первоначального положения. Конус, установленный на вершине, или яйцо, стоящее на остром конце, — примеры тел в неустойчивом равновесии. Вообще говоря, тело находится в состоянии неустойчивого равновесия, если при легком толчке его центр тяжести опускается. Тело после толчка продолжает двигаться, пока его центр тяжести не опустится в самое низкое положение, возможное при данных условиях. Если тело поддерживается каким-нибудь острием, то условие, чтобы оно было в неустойчивом равновесии, это — чтобы центр тяжести тела был выше точки опоры.

Резюме. **Закон Ньютона и всемирное тяготение. Всякие два тела во вселенной притягивают друг друга с силой прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.**

Центр тяжести тела — это точка приложения равнодействующей всех сил тяжести, действующих на частички тела и направленных вниз. Другими словами, центр тяжести — это точка, в которой можно считать сосредоточенной всю массу тела. Тело находится в равновесии, когда равнодействующая всех сил, действующих на него, равна нулю.

Тело находится в устойчивом равновесии, если при легком толчке его центр тяжести стремится подняться.

Тело находится в безразличном равновесии, если легкий толчок не опускает и не поднимает его центра тяжести.

Тело находится в неустойчивом равновесии, если при легком толчке его центр тяжести стремится опуститься.

Вопросы и задачи.

1. (1) Определите различие между массой и весом. (2) Можно ли с помощью пружинных весов доказать, что вес тела меняется при переносе из экваториальной области в полярную? Объясните.

2. Получите ли вы в Панаме больше сахара на фунт, чем в Нью-Йорке, если взвешивание производится на чашечных весах? на пружинных весах? Объясните.

3. Как изменился бы ваш вес, если бы ваша масса увеличилась в 4 раза, а масса земли в 3 раза, причем радиус земли остался бы прежний?

4. Земля притягивает тело, находящееся на поверхности земли, с силой в 100 *кг*. С какой силой земля притянет это же тело, находящееся на высоте 6 300 *км*? 1 575 *км*? 4 *км*? (Радиус земли = 6 300 *км*).

5. Если сбалансировать на пальце карандаш острием вниз, он будет в неустойчивом равновесии. Если же воткнуть в карандаш 2 ножа, как изображено на рис. 72, он будет в устойчивом равновесии. Почему?

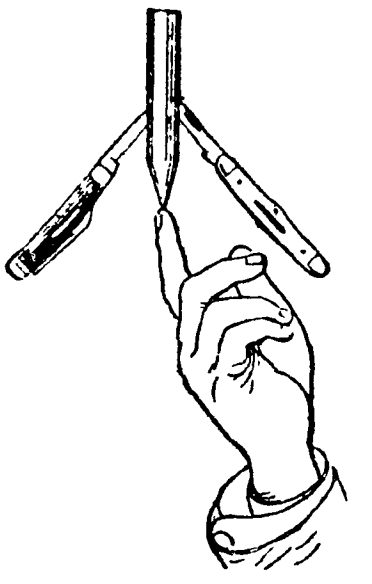


Рис. 72.

6. Для чего нужен балласт на корабле?

7. Какое положение кирпича самое устойчивое? Самое неустойчивое? Почему?

В каком равновесии находится покоящийся маятник? Почему?

ПАДЕНИЕ ТЕЛ.

90. Первые опыты Галилея. В жизни нам очень часто приходится иметь дело с падающими телами. А между тем многие из нас не могут уверенно ответить на самые простые вопросы, касающиеся падения тел, если для этого требуются некоторые количественные сведения о силе тяготения. Возьмем, например, такой вопрос: камень и кусок свинца падают с одинаковой высоты. Достигнут ли они земли одновременно или нет? Галилей поставил этот вопрос и дал на него правильный ответ, примерно, в 1590 году и тем самым, в сущности, положил начало современной науке.

Из повседневного опыта известно, что легкие тела, как, например, перья, падают медленно, а тяжелые — камни, например, — быстро. И в школах вплоть до Галилея учили, что «скорость падения тел пропорциональна их весу». Однако Галилея не удовлетворили одни книжные познания. Он сам стал производить опыты над падающими телами. В присутствии профессоров и студентов Пизанского

университета он бросал с вершины Пизанской башни (рис. 73), высота которой 60 *м*, шары разной величины и из различного материала. Оказалось, что все они достигали земли приблизительно в одно время. Галилей показал, что даже для очень легких тел, например, бумажных, скорость падения делается очень близкой к скорости тяжелых тел, если только сделать их достаточно компактными. Из этих опытов Галилей заключил, что все тела, включая и самые легкие, падали бы с одинаковой скоростью, если бы не было сопротивления воздуха.

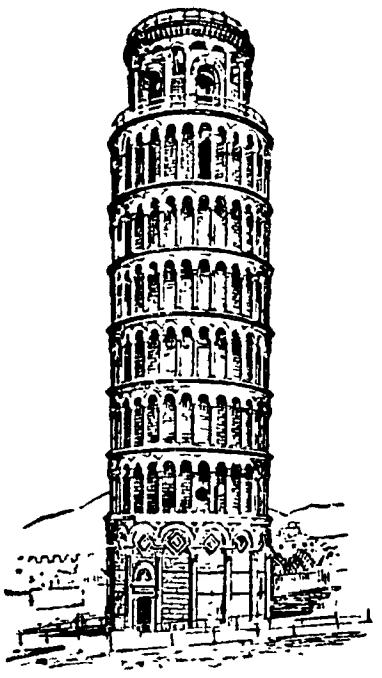


Рис. 73. Наклонная башня в Пизе, на которой Галилей производил часть своих знаменитых опытов с падающими телами.

Можно показать, что сопротивление воздуха, действительно, является главной причиной медленности падения легких тел. Для этого выкачаем воздух из трубки, в которой находится перо (или несколько маленьких кусочков промокательной бумаги) и монета (рис. 74). Поставим трубку вертикально.

Чем лучше разрежение в трубке, тем точнее перо и монета падают друг возле друга с одинаковой скоростью. Однако воздушный насос был изобретен только через 60 лет после смерти Галилея.

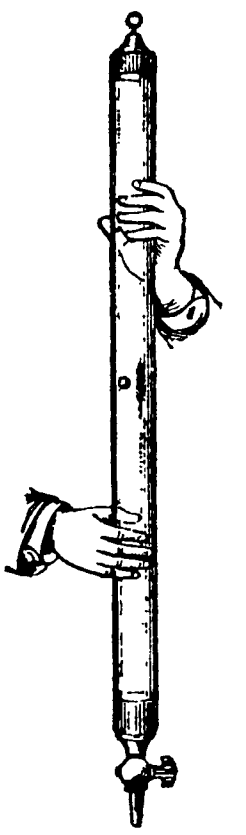


Рис. 74. Монета и перо падают в пустоте с одинаковой скоростью.

91. Точное доказательство утверждения Галилея. Сам Галилей доказал правильность своего заключения другим путем.

Заставим стальные и деревянные шарики (не менее 2,5 *см* в диаметре) двигаться по наклонной плоскости (рис. 75). Мы увидим, что они все время будут катиться все с одинаковой скоростью.

(Если шары катятся по узкому жолобу, они должны все быть одного диаметра; если же путь широкий, размеры шариков не имеют значения). В сущности этот опыт отличается от опыта с свободно падающими телами только тем, что здесь движение шаров более медленное, а потому и сопротивление воздуха становится почти незаметным.

Чтобы заставить тела двигаться еще медленнее и чтобы в то же время избавиться от трения о наклонную плоскость, Галилей при-

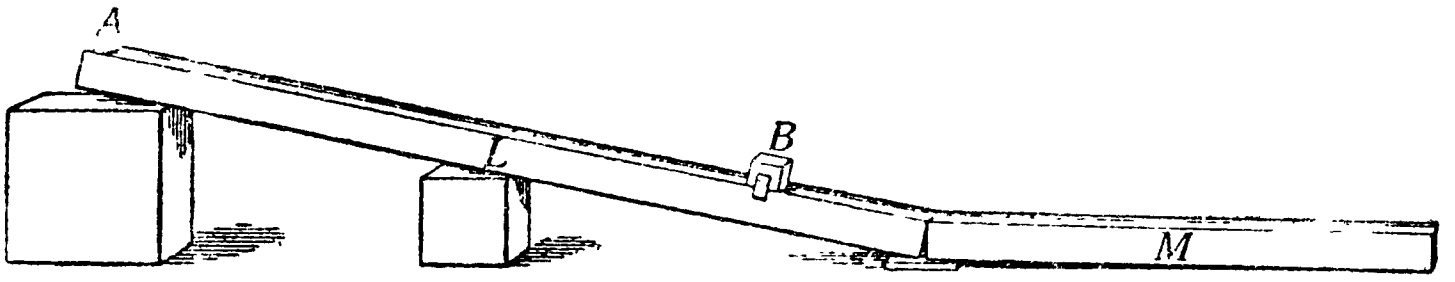
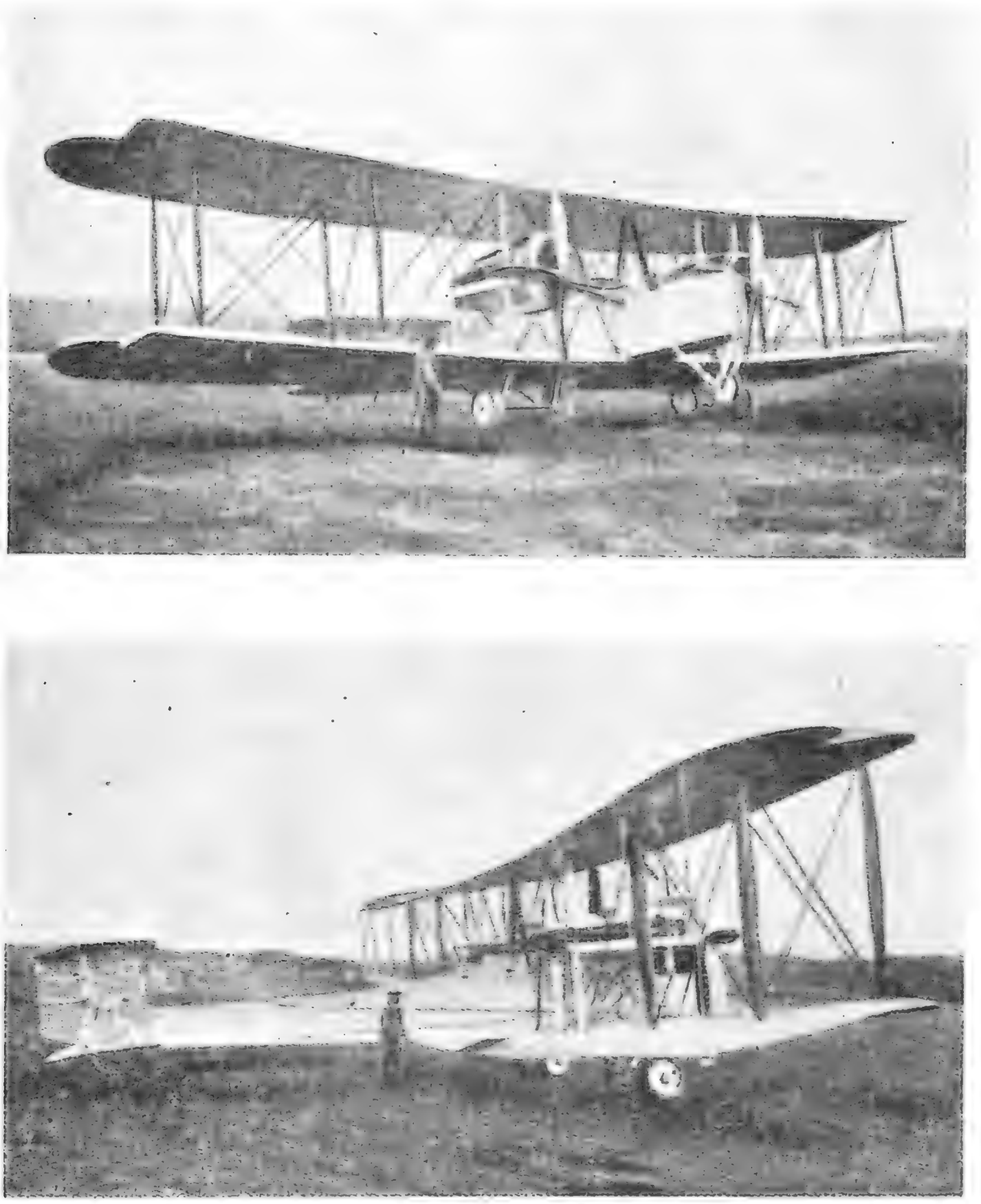


Рис. 75. Пути, пройденные падающими телами, и приобретенные ими скорости в течение 1, 2, 3 и т. д. секунд.

думал следующий опыт. Он привесил различные шары к чечевицам маятников, длина которых была в точности одинакова. Затем он заставил маятники колебаться, причем все они описывали в точности одинаковые дуги. Как видите, он проделал опыт, описанный в § 83. Как известно, чечевица при любом размахе маятника движется вниз

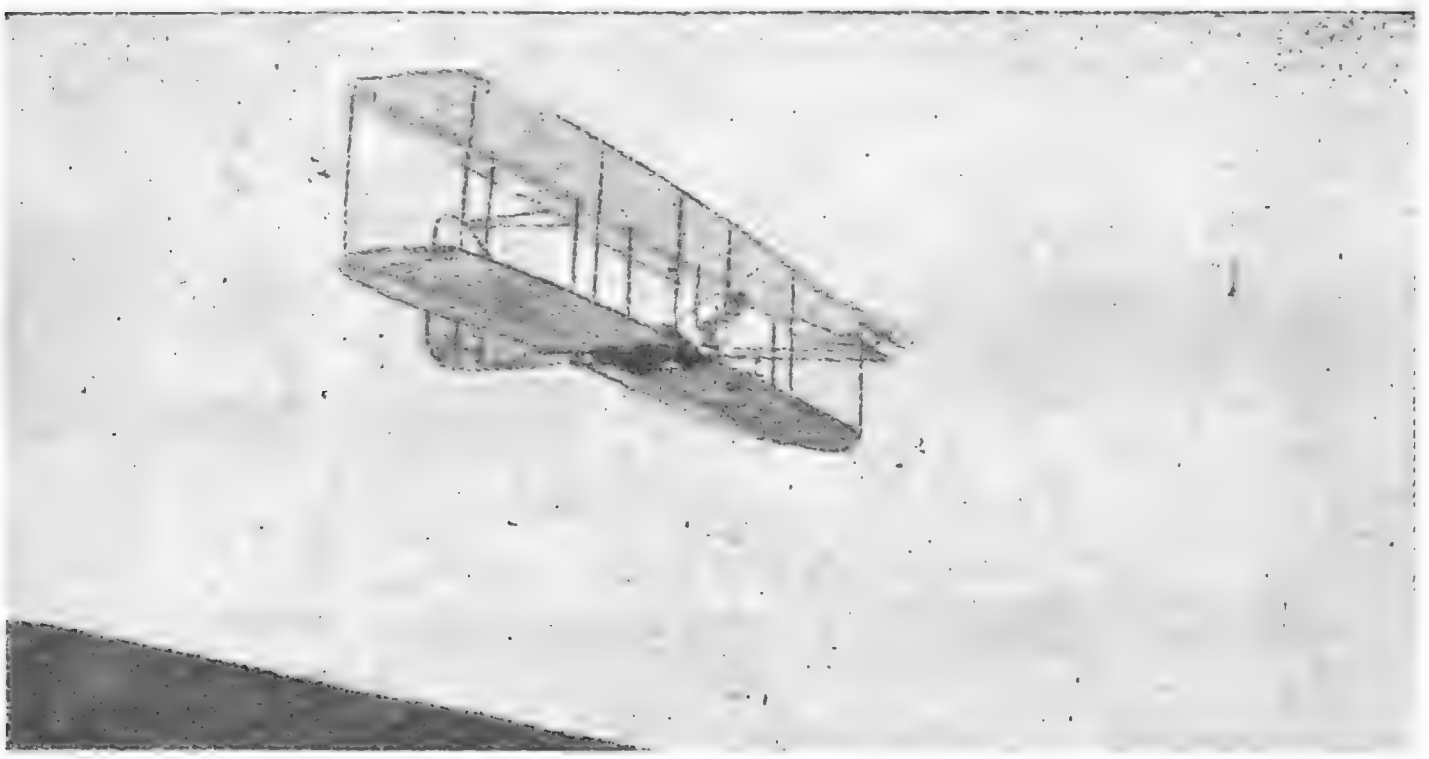
чрезвычайно медленно (рис. 63). Отсюда ясно, что этот опыт, в сущности, сводился к предыдущему опыту Галилея, только сделанному



АЭРОПЛАН ВИКЕРС-ВИМИ.

Первый безостановочный перелет через океан на аэроплане был совершен 14 июля 1919 г., из Ст.-Джонс, на Ньюфаундлэнде, в Клифден, в Ирландии; расстояние это равно 1 890 миль. Этот исторический перелет — по тому времени самый длинный — был проделан в 15 ч. 57 м., сквозь туман и иней, при средней скорости в 118,5 миль в час. За этот подвиг была присуждена премия в 50 000 долларов, предлагавшаяся в течение, примерно, пяти лет лондонской газетой «Дэйли Мэйль». Аэроплан этот был снабжен двумя моторами Роллье-Ройс, по 360 л. с. каждый· запас газолина равнялся 865 галлонов. Пилотом был капитан Джон Алкок, капитаном-лейтенант Артур Броун. Ширина крыльев этого аэроплана равна 22 *м*, а длина — 14 *м*.

более тонко. Галилей нашел, так же как и мы в § 83, что времена падения — или, другими словами, времена колебания маятников — были в точности одинаковы.



АЭРОПЛАН РАЙТА.

В двадцатом веке осуществилось одно из самых значительных культурных завоеваний — победа человека над воздухом. Начало этой победы относится к тому моменту, когда братья Райт впервые применили принцип, на котором теперь основан всякий удачный полет аппарата тяжелее воздуха, а именно поддержание равновесия с помощью буксования крыльев и употребления весла.

На верхнем рисунке изображен один из планеров (внутри — Вильбур Райт), на котором Райты изучили искусство планирования 1900 — 1903) и совершили более тысячи скользящих полетов, некоторые в 200 *м* длиной. При этом они следовали принципам, скользящего полета, впервые демонстрированного Лилиенталем, а затем Чануто в Чикаго (1895 — 1897).

На нижнем рис. показан уже более совершенный «первый в мировой истории удачный полет» (Орвиль Райт внутри, Вильбур бежит за поднимающимся аппаратом). 4 таких полета были совершены 17 декабря 1903 г. Из них самый длинный длился 59 сек. и покрыл расстояние в 284 *м.*, против ветра, скоростью в 20 миль.

Все описанные только что опыты заставляют нас заключить вместе с Галилеем и Ньютоном (который весьма тщательно про

верил это через 100 лет после опытов Галилея), что в пустоте скорость, приобретаемая в секунду свободно падающим телом, в точности одинакова для всех тел.

92. Соотношение между временем падения и пройденным путем. Итак, мы узнали, что, когда нет сопротивления воздуха, все тела падают совершенно одинаково. Попробуем теперь найти соотношение между временем падения и пройденным путем. Но свободно падающие тела падают так быстро, что на них трудно непосредственно делать какие-нибудь измерения. Поэтому мы последуем примеру Галилея и будем изучать законы падения тел, наблюдая шар, катящийся по наклонной плоскости.

Установим доску с жолобом, длиной в 6 *м*, как показано на рис. 75; пусть один конец будет, примерно, на 0,5 *см* выше другого. Нанесем на доске деления через каждые 50 *см*. Поставим параллелепипед *B* как раз на 16-е деление, т. е. на расстояние 8 *м* от начальной точки пути стального шарика *A*. Пустим в ход часы или метроном, отбивающий секунды. Затем, изменяя, если нужно, наклон, добьемся того, чтобы шарик сталкивался с параллелепипедом *B* одновременно с пятым ударом метронома (Учитель может сделать это до начала урока.)

Затем снова пустим шарик одновременно с каким-нибудь ударом метронома. Тогда мы увидим, что шарик пройдет мимо первого деления в конце первой секунды, мимо 4-го деления — в конце 2-й секунды, мимо 9-го — в конце 3-й секунды, и ударится о параллелепипед *B*, стоящий на 16-м делении, в конце 4-й секунды (рис. 76). Чтобы отмечать более точно момент прохождения шарика через деления, можно последовательно ставить *B* на 1-е, 4-е и 9-е деления и следить, чтобы звук от столкновения шарика с параллелепипедом точно совпадал с ударом метронома.

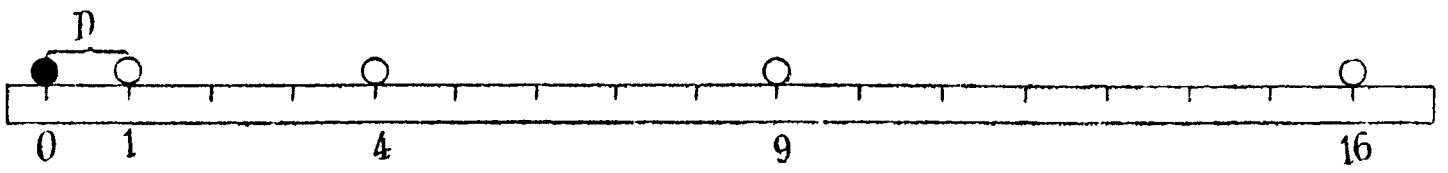


Рис. 76. Путь, пройденный телом в течение каждой из первых 4-х секунд.

Отсюда мы заключаем вместе с Галилеем, что путь, пройденный любым падающим телом в течение любого количества секунд, равен пути, пройденному телом в первую секунду, умноженному на число секунд в квадрате. Так, например, если *D* — расстояние, пройденное в 1-ю секунду, а *S* — весь путь и *t* — число секунд, то $S = Dt^2$.

93. Соотношение между скоростью и временем падения. В предшествующем параграфе мы интересовались путем, пройденным в одну, две, три секунды и т. д. Посмотрим теперь, какие скорости приобретает шарик при движении по той же наклонной плоскости в течение одной, двух и т. д. секунд.

Приложим к нашей наклонной плоскости вторую, как показано на рис. 75. Чтобы исключить трение, дадим ей небольшой наклон так, чтобы шарик катился по ней с постоянной скоростью. Затем пустим шарик, но не из точки *A*, а из более низкой точки *D*. За *D* берем точку, в которую шарик в предыдущем опыте приходил в конце первой секунды. Тогда шарик дойдет до конца наклонной плоскости в момент второго удара метронома. Здесь шарик освободится от действия силы тяжести и будет поэтому двигаться вдоль нижней плоскости со скоростью, которую он имел в конце 1-й секунды. Поместив параллелепипед в точности на расстоянии 2*D* от конца наклонной плоскости,

мы увидим, что шарик ударится об него в момент 3-го удара метронома т. е. пробежав ровно 2 секунды. Следовательно, скорость, приобретенная шариком в конце 1-й секунды, равна $2D$ [рис. 77 (1)]. Если пустить шарик из точки на расстояние $4D$ от конца наклонной плоскости, он пройдет путь $4D$ в 2 сек., а в следующую секунду пробежит расстояние $4D$ по горизонтальному жолобу. Это значит, что в 2 секунды шарик приобрел скорость $4D$ [рис. 77 (2)]. Точно также можно убедиться в том, что в 3 сек. шарик приобретет скорость $6D$ и т. д. [рис. 77(3)].

Предыдущий опыт показывает, что точное значение слова «скорость» есть «быстрота движения в данный момент». Численно скорость равна пути, который тело проходило бы в одну секунду, если бы, начиная с рассматриваемого момента, оно начало двигаться равномерно. Это как раз имело место в нашем опыте в конце первой, второй и третьей секунды.

Далее. Тот же опыт показывает, что скорость падающего тела в каждую секунду увеличивается на одну и ту же величину. И, наконец, оказывается, что это приращение скорости численно равно удвоенному пути, пройденному телом в первую секунду.

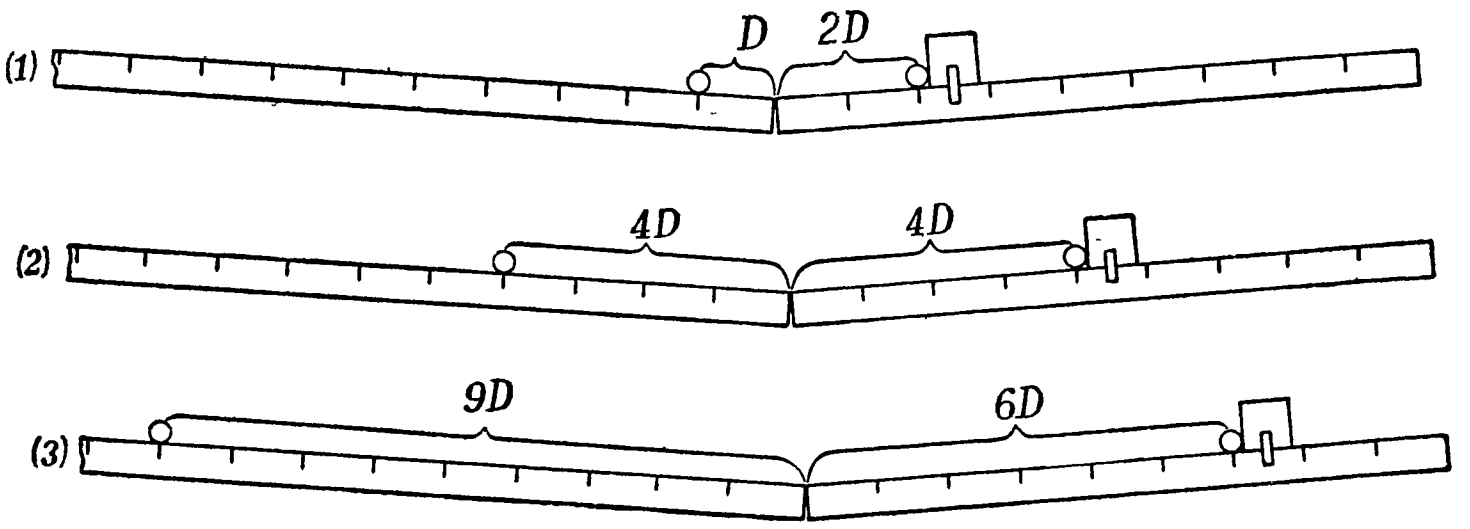


Рис. 77. Скорости к концу 1, 2 и т. д. секунд.

Движение, при котором скорость равномерно возрастает или убывает (как в разобранном выше случае) называется равномерно ускоренным движением.

Приращение или убывание скорости в каждую секунду при равномерно ускоренном движении называется ускорением. Численно оно равно удвоенному пути, пройденному в первую секунду.

94. Формальное подтверждение закона падения тел. Сопоставляя результаты двух последних параграфов, можно составить следующую таблицу. D обозначает путь, пройденный в течение первой секунды при всяком равномерно-ускоренном движении.

Число секунд (t)	Скорость в конце каждой сек. (v)	Приращение скорости в каждую секунду (a)	Весь пройденный путь (s)
1	$2D$	$2D$	$1D$
2	$4D$	$2D$	$4D$
3	$6D$	$2D$	$9D$
4	$8D$	$2D$	$16D$
. . .	. . .	. . .	. . .
t	$2tD$	$2D$	t^2D

В § 93 мы показали, что D равно половине ускорения a. Поэтому, подставляя $^1/_2\,a$ вместо D в последнюю строку таблицы имеем:

$$V = at \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

$$S = \frac{1}{2}\,at^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Эти формулы являются просто алгебраическим выражением фактов, выяснившихся при нашем опыте. Попытаемся теперь уяснить себе эти факты.

Ускорение a равномерно-ускоренного движения есть скорость, приобретаемая телом в каждую секунду. Отсюда: когда начинает двигаться неподвижное тело, скорость его через t секунд достигает величины $v = at$. Это первая формула.

Перехо̀им к другой формуле. Вспомним, что пройденный путь всегда равен произведению средней скорости на время. Когда начальная скорость равна нулю, как в данном случае, а конечная скорость есть at, — средняя скорость равна $\frac{0 + at}{2} = \frac{1}{2}\,at$. Отсюда

$$S = \frac{1}{2}\,at^2$$

Это и есть вторая формула.

Это — основные формулы для равномерно ускоренного движения. Однако, иногда бывает удобнее вычислять конечную скорость v прямо из всего пройденного при падении тела пути — S, или наоборот. Это, очевидно, можно сделать, просто подставляя в (2) значение t, полученное по (1), а именно: $\frac{v}{a}$

Тогда имеем

$$v = \sqrt{2a\,S} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

95. Ускорение свободно падающего тела. Если в опыте, описанном в § 93, сделать наклон плоскости более крутым, результаты, очевидно, получатся точно те же самые, только ускорение будет иметь большее значение. Постепенно поднимая наклонн ю плоскость, можно сделать ее вертикальной. Тогда тело будет свободно падать (см. рис. 78). В этом случае путь, пройденный телом в первую секунду, равен 490 *см*. Значит, ускорение в каждую секунду равно 980 *см* в сек. Это ускорение при свободном падении тела называется у с к о р е н и е м с и л ы т я ж е с т и и обыкновенно обозначается буквой g. Таким образом, 3 формулы предыдущего параграфа для свободно падающего тела имеют вид:

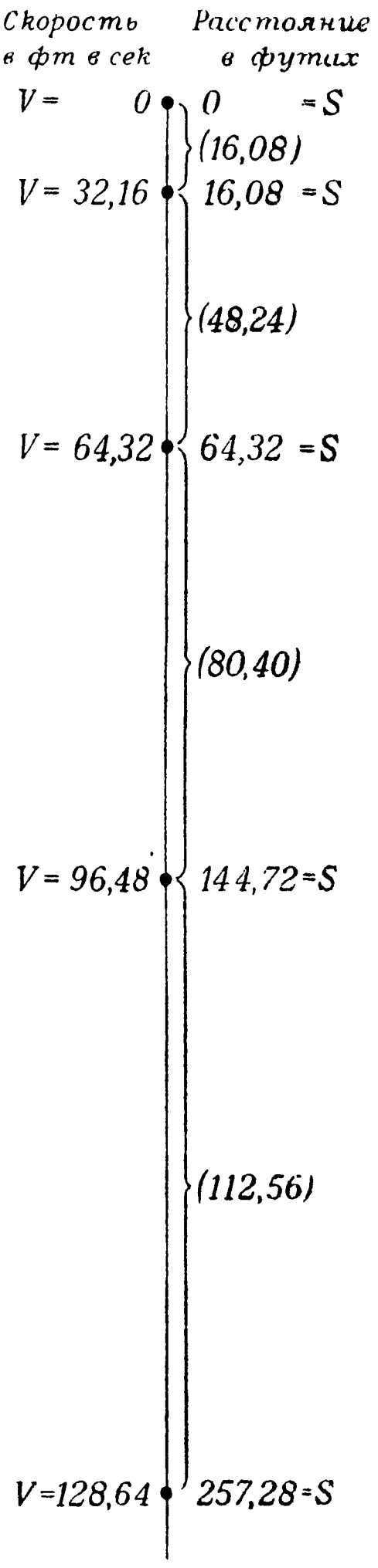


Рис. 78. Свободно падающее тело.

$$v = gt \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

$$S = \frac{1}{2}\,gt \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

$$V = \sqrt{2gS} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Посмотрим, как можно пользоваться этими формулами. Положим, что надо узнать, с какой скоростью достигает земли тело падающее с высоты 200 *м*, т. е. 20 000 *см*.

Из формулы (6) имеем

$$v = \sqrt{2 \times 980 \times 20\,000} = 6\,261 \text{ } см \text{ в сек.}$$

Точное определение величины g никогда не производят непосредственным измерением: в § 83 мы видели, что самым точным из существующих инструментов для таких измерений является маятник. Надо только измерить длину l длинного маятника и время t между двумя последовательными прохождениями чечевицы через среднюю точку и подставить эти значения в формулу $t = \Pi \sqrt{\frac{e}{g}}$. Отсюда значение g получается с большой степенью точности. Вывод этой формулы выходит за пределы элементарного курса физики, но самой формулой отлично можно пользоваться для определения g.

96. Высота подъема. До какой высоты поднимется тело, брошенное вертикально вверх? Это легко рассчитать. Время подъема должно быть численно равно начальной скорости тела, брошенного вверх, деленной на ежесекундное уменьшение его скорости. Значит, $t = \frac{v}{g}$. А достигнутая телом высота должна быть равна t, умноженному на среднюю скорость $\frac{e + 0}{2}$ Значит:

$$S = \frac{v^2}{2}; \text{ или } v = \sqrt{2gS} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

Таким образом, формула (7) тождественна с (6). Следовательно, в пустоте скорость, с которой тело должно быть подброшено кверху, чтобы достигнуть некоторой заданной высоты, та же, что и скорость тела, падающего с той же высоты.

97. Траектория снаряда. Положим, что снаряд летит по направлению ab (рис. 79). Не будь силы тяжести и сопротивления воздуха, снаряд двигался бы с однородной скоростью по направлению ab, попадая в точки 1, 2, 3 и т. д. в конце первой, второй и т. д. секунд. Однако действие силы тяжести заставляет снаряд пройти ниже этих точек на 4,9 *м*, на 19,6 *м* = 4,9 × 4, на 44,1 *м* = 4,9 × 9; и т. д. Т. е. снаряд должен был бы пойти по пути, нарисованному пунктиром (по параболе). Однако сопротивление воздуха уменьшает высоту и скорость полета. Окончательная траектория снаряда подобна кривой, начерченной сплошной линией. На рис. 80 изображен процесс сбрасывания бомб с аэроплана.

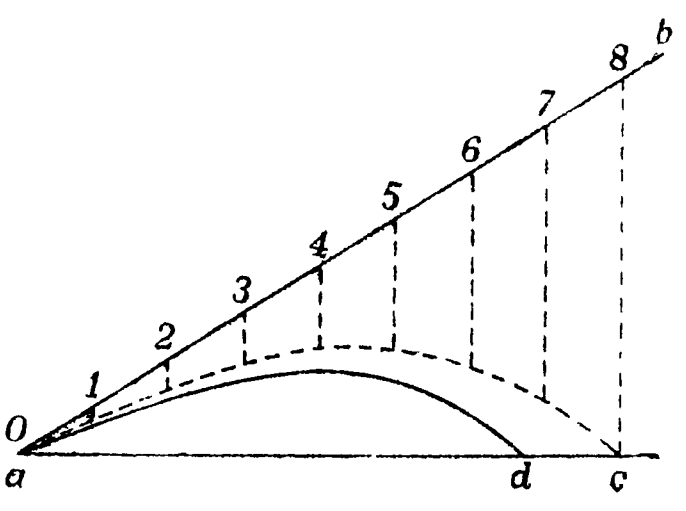


Рис. 79. Путь снаряда.

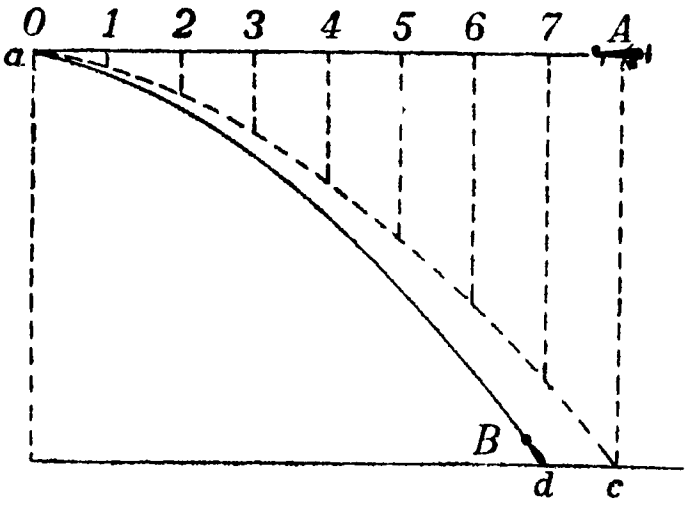


Рис. 80. Бомба B была осброшена с аэрплана A в точке a.

98. Аэроплан. Проще всего можно изучить проблему полета на обыкновенном детском воздушном змее. Положим, что ab [рис. 81 (1)] — летящий по ветру змей, привязанный за веревку. Предположим, далее, что змей не имеет веса и что угол поверхности змея с направлением ветра все время остается равным i. Хорошо из-

вестно, что ветер производит на змей двоякое действие. С одной стороны, ветер стремится поднять змей, и в то же время он толкает змей назад в горизонтальном направлении. Обозначим оба эти действия вертикальной прямой — «подъем» и горизонтальной — «тормоз». Очевидно, раз веревка мешает ветру произвести действия, которые он стремится произвести, натяжение веревки как раз должно быть равно, противоположно по направлению и приложено в ту же точку, что и равнодействующая сил «подъема» и «тормоза». Эта равнодействующая всегда приблизительно перпендикулярна к AB. Отклонение от точного перпендикулярного направления вызвано трением

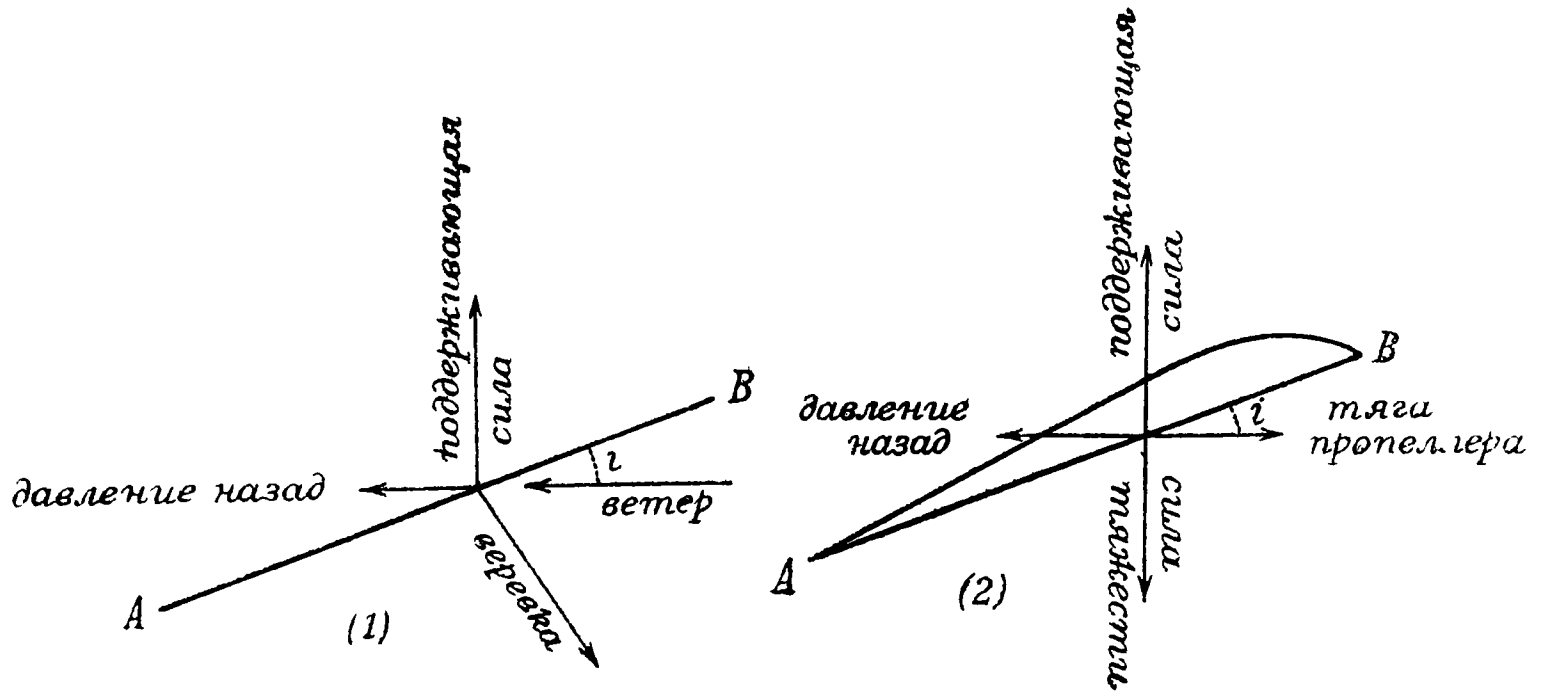


Рис. 81. Силы, действующие на воздушный змей и на аэроплан.

змея о воздух. Вместо одной силы, а именно натяжения веревки, можно воспользоваться двумя силами: одной, направленной вертикально вниз, уравновешивающей «подъем», и второй — направленной горизонтально вперед — уравновешивающей «тормоз». Результат получится тот же самый. Аэроплан [рис. 81 (2)] так именно и устроен. Вес аэроплана является силой, направленной вертикально вниз; при равномерном движении эта сила как раз равна и противоположна подъемной силе. Сила, направленная вперед, дается пропеллером, приводимым в движение мотором. Она равна и противоположна «тормозу». Короче говоря, аэроплан держится в воздухе потому, что сила пропеллера толкает его вперед и вызывает таким образом относительный ветер, тот в свою очередь движет крылья аэроплана так, что развивается подъемная сила равная весу аэроплана.

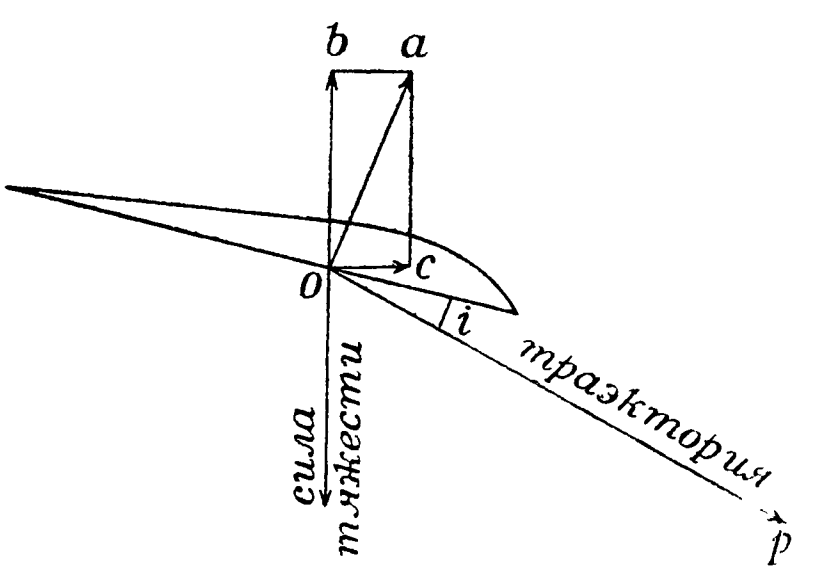
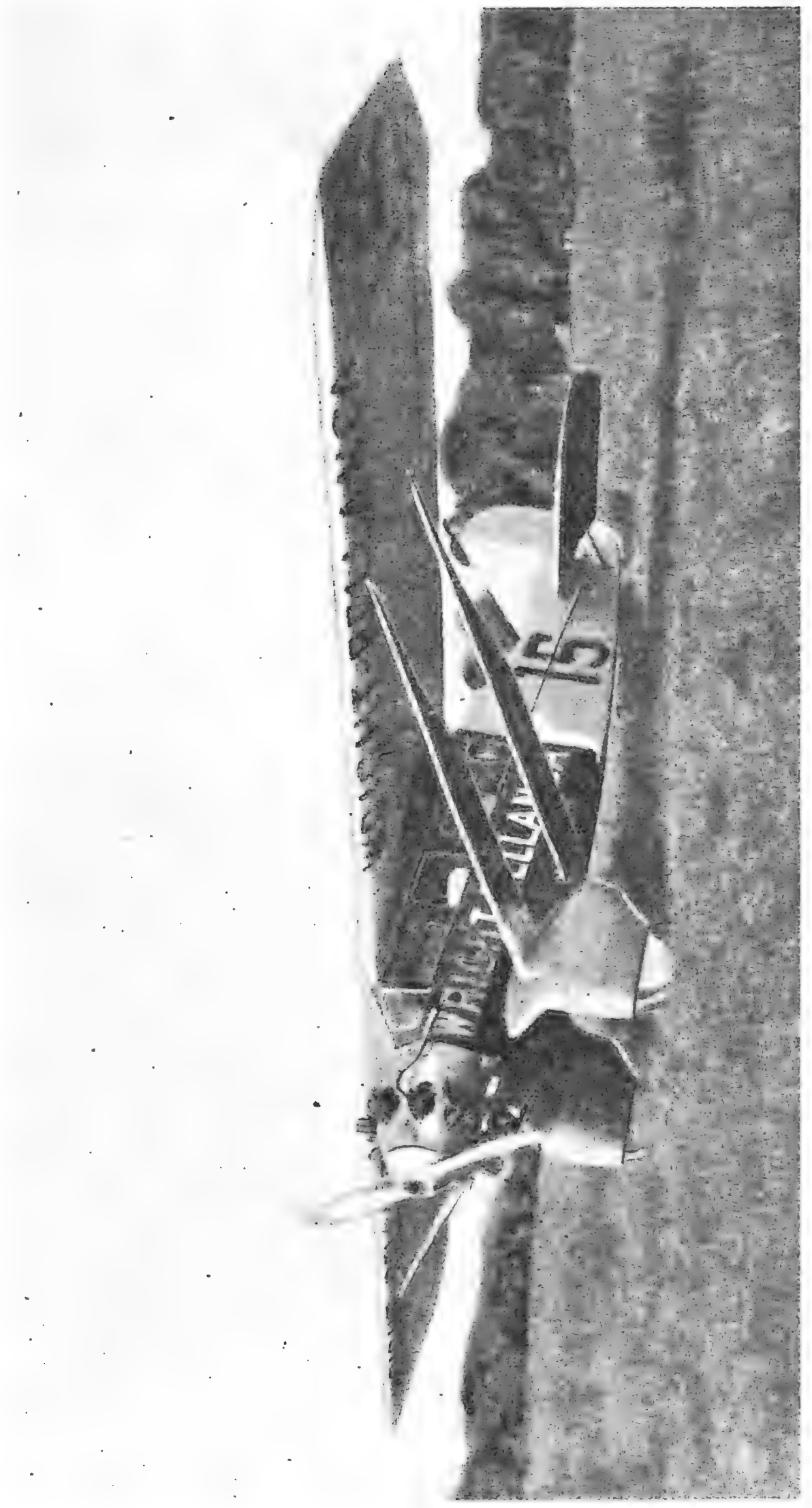


Рис. 82. Скользящий полет.

99. Скользящий полет. Стоит машине остановиться, как аэроплан под влиянием силы тяжести падает вниз. На рис. 82 изображены силы, действующие при скользящем полете в спокойном воздухе при остановившейся машине. Поверхность аэроплана движется вниз и вперед, под некоторым углом i, вдоль пути ap. Относительный ветер po,

который в спокойном воздухе противоположен направлению пути, действует на крылья с некоторой силой. Равнодействующую этих сил можно изобразить прямой *oa*. Как было показано в § 98, она приблизительно перпендикулярна поверхности аэроплана. Разложим силу *oa* на горизон-



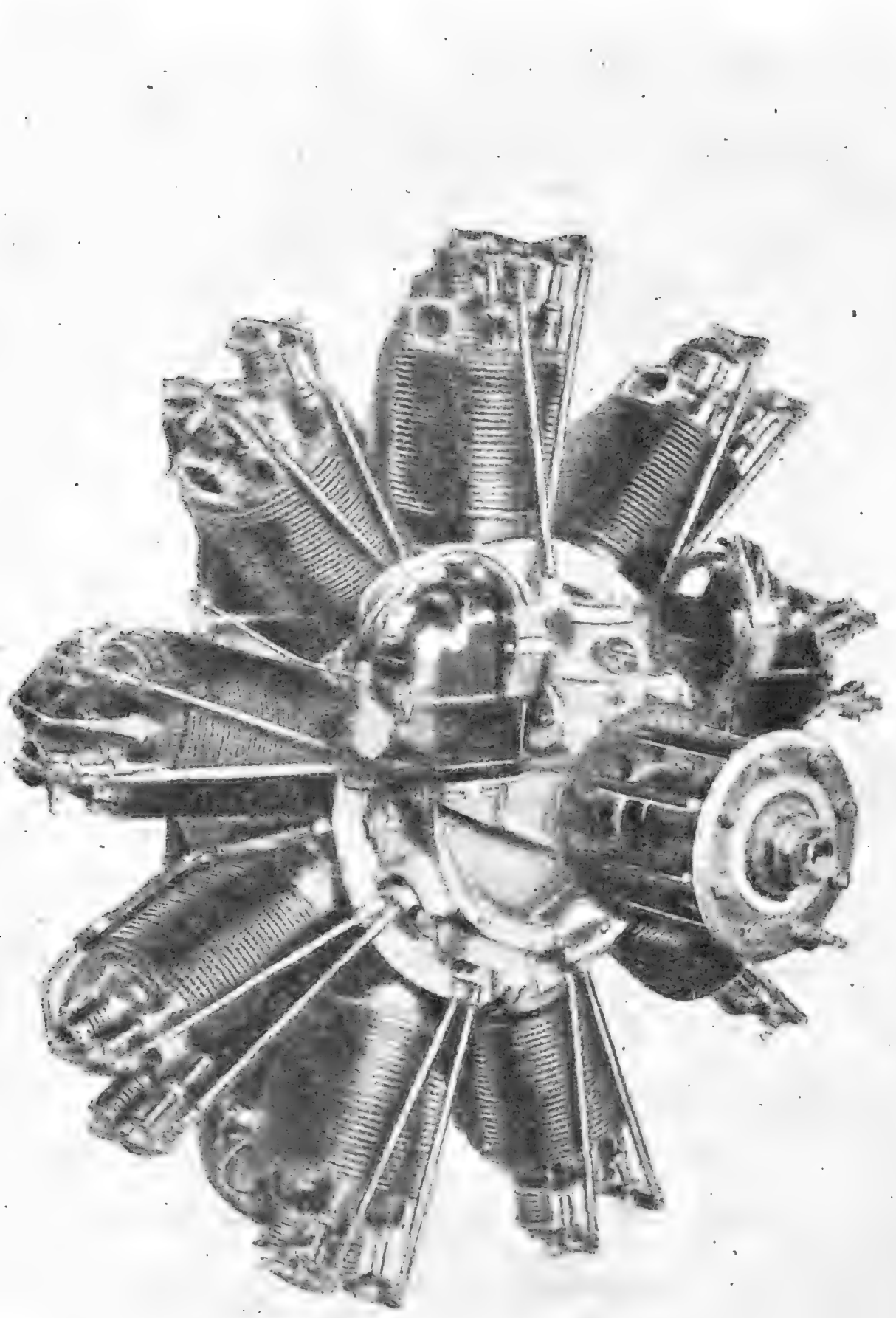
АЭРОПЛАН РАЙТ-БЕЛЛАНКА.

Новый тип пассажирского аэроплана отличается безопасностью, большой скоростью, большой грузоподъемностью, комфортом и экономичностью. Мощность его 100 л. с. Потребление горючего — 1 галлон на 8 миль. Пассажиры сидят в удобной закрытой каюте.

тальную и вертикальную составляющие *ob* и *oc*; *ob* уравновешивает вес, а сила *oc* есть давление воздуха в этом случае толкающее аэроплан вперед.

100. Принцип роторного судна (см. рис. 83). Полет зиждется еще на одном принципе. Это принцип, лежащий в основе р о т о р н о г о с у д н а **Флетнера.**

Положим, что *A* [рис. 83 (1)] — шар, приведенный во вращение справа налево, как показано на рисунке. Пусть *RR* (рис. 83 (2)) — гигантские цилиндры; они приводятся машинами в быстрое вращение, и в то же время мимо них дует сильный ветер. В первом случае шар движется вперед;



ДВИГАТЕЛЬ РАЙТА.

Мощность 200 л. с., 9-ти цилиндровый, с водяным охлаждением. Широко употребляется в авиации для перевозки пассажиров, съемки планов, уничтожения вредителей полей, борьбы с лесными пожарами.

во втором—на вращающиеся цилиндры дует ветер. Поэтому в обоих случаях воздух движется по отношению к вращающимся телам в направлении, обозначенном пунктирными стрелками. В нижней части рисунка точки воздуха, вызванные вращением тел (см. пунктирные круги), очевидно, противоположны токам воздуха, обозначенным прямыми пунктирными стрелками. Поэтому в нижней части давление воздуха увеличивается (см. +).

В верхней части рисунка и те и другие токи направлены одинаково, поэтому там давление воздуха уменьшается (см. —). Таким образом, в силу разности давлений вращающиеся тела толкаются в направлении вертикальных стрелок, перпендикулярно к направлению движения шара или относительного ветра.

Крылья аэроплана не вращаются. Однако им придается такая форма, что при движении крыльев вперед вокруг них появляются круговые воздушные токи, идущие справа налево и создающие, как на рисунке 83 [(1) и (2)], избыток относительного давления с нижней стороны. Этого избытка давления достаточно для горизонтального полета аэроплана, даже если его нижняя часть несколько наклонена вниз, как на рис. 82. Эту разницу давления можно, пожалуй, объяснить еще проще с помощью принципа Бернулли (рис. 83). Вследствие особой формы крыльев скорость воздуха, обтекающего крылья, больше с верхней стороны крыльев, чем с нижней.

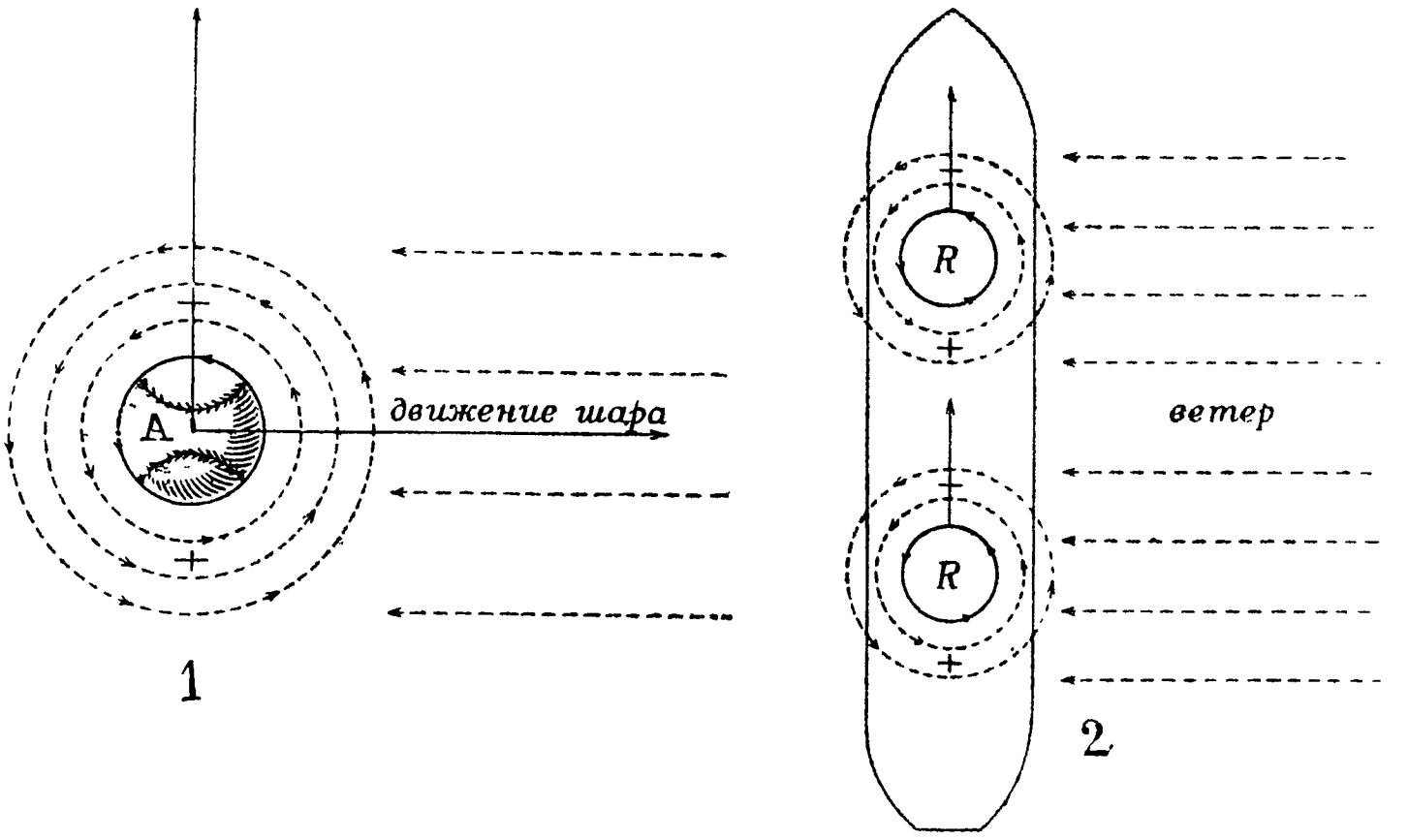


Рис. 83. Иллюстрация принципа Бернаулли.

Резюме. **В пустоте все тела, независимо от их размеров и веса, падают одинаково быстро.**

Путь, пройденный падающим телом в течение некоторого числа секунд, равен пути, пройденному в первую секунду, умноженному на число секунд в квадрате. $S = Dt^2$.

Скорость есть быстрота движения в данный момент. Численно скорость равна пути, который тело приходило бы в одну секунду, если бы, начиная с данного момента, оно стало двигаться равномерно. Ускорение — это быстрота изменения скорости. Равномерно-ускоренным называется движение, при котором быстрота приращения или уменьшения скорости постоянна. Численно ускорение равно удвоенному пути, пройденному в первую секунду т. е. $a = 2D$. **Приобретенная или потерянная скорость равна ускорению, умноженному на время, Т. е.** $v = at$.

Если начальная скорость равна нулю (тело было в покое), то конечная скорость v **и путь** S **связаны соотношением** $v = \sqrt{2aS}$.

Ускорение свободно падающих и свободно поднимающихся тел обозначают буквой g **(каждую секунду** $= 980$ *см* **в сек.).**

Весь пройденный путь всегда равен произведению средней скорости на время.

Всякий снаряд уклоняется от своего начального пути согласно законам свободного падения тел.

Аэроплан поддерживается в воздухе вертикальной слагаемой силы, с которой воздух напирает на его поверхности.

Вопросы и задачи.

1. Один мальчик говорит, что целый кирпич упадет вдвое скорее, чем полкирпича, так как земля притягивает его вдвое сильнее; другой мальчик утверждает, что целый кирпич упадет вдвое медленнее, так как его в два раза труднее привести в движение. Кто из них прав? Объясните. Проверьте на опыте.

2. *a*. Лодка скользит вниз по реке со скоростью 1 *м* в первую секунду. Без формул ответьте на следующие вопросы: 1) Сколько прошла лодка в две секунды? 3 сек.? 4 сек.? 5 сек.? 2) Сколько прошла лодка в течение пятой секунды? 3) Каково было ускорение? 4) Какова была скорость в конце пятой секунды? 5) Какова была средняя скорость за первые 5 секунд?

b. Зная среднюю скорость, вычислите путь, пройденный лодкой в течение 5 секунд. Сходится ли ваш ответ с ответом на последний вопрос (1).

c. На основании скорости в начале и в конце пятой секунды найдите среднюю скорость в течение 5-й секунды. Зная эту среднюю скорость, вычислите путь, пройденный в течение 5-й сек. Сходятся ли результаты с вашим ответом на вопрос (2)?

3. Автомобиль находился в покое. Его привели в движение. В течение 5 сек. он приобрел скорость в 10 *км* в час. Найдите у с к о р е н и е, полагая его постоянным.

4. Шар толкнули на льду с начальной скоростью в 30 *км* в сек. Трение задерживало его движение на 1 *м/сек.*^{2} (1 *м/сек.* в каждую секунду). Сколько секунд шарик катился по льду? Какова была его средняя скорость за это время? Вычислите по средней скорости пройденный путь. Вычислите пройденный путь из формулы $S = \frac{1}{2}at^2$.

5. Конькобежец, достигший скорости в 20 *м/сек*, перестал двигать ногами и просто скользил. Он остановился, покрыв расстояние в 200 *м*. Найдите его среднюю скорость во время скольжения, время, в течение которого было пройдено 200 *м*, и ускорение.

6. Из винтовки, дуло которой имело 60 *см* в длину, произведен выстрел. Пуля вылетела со скоростью в 800 *м/сек*. Найдите (1) среднюю скорость пули в дуле; (2) время, в течение которого пуля двигалась в дуле, и (3) ускорение пули при движении внутри дула.

7. Мальчик, стоя на мосту, бросил в воду камень. Он заметил, что камень долетел до воды ровно в 3 сек. Какова была скорость камня в момент соприкосновения с водой? Какова была его средняя скорость в течение 3 сек.? Зная эту среднюю скорость, вычислите, какой путь должен был пройти камень в течение этих 3 секунд? ($g = 9{,}8$ *м/сек*^{2})

8. (1) Какую добавочную скорость дает земное притяжение каждую секунду свободно падающему телу? Какую скорость отнимает оно ежесекундно от свободно поднимающегося тела (2)? Пуля выброшена вертикально вверх со скоростью 800 *м/сек*. Пренебрегая сопротивлением воздуха, найдите *a*) через сколько времени пуля остановится благодаря земному притяжению, *b*) среднюю скорость за время подъема, *c*) зная среднюю скорость и время подъема, определите высоту, до которой поднимется пуля, *d*) из формулы $S = \frac{1}{2}at^2$, найдите высоту подъема ($g = 9{,}8$ *м/сек.*^{2})

9. Какой путь пройдет падающее тело в течение первой полсекунды, если начальная скорость его была равна нулю?

10. Мяч был подброшен вертикально вверх со скоростью 50 *м/сек*. Сколько секунд оставался он в воздухе? ($g = 9{,}8$ *м/сек.*^{2})

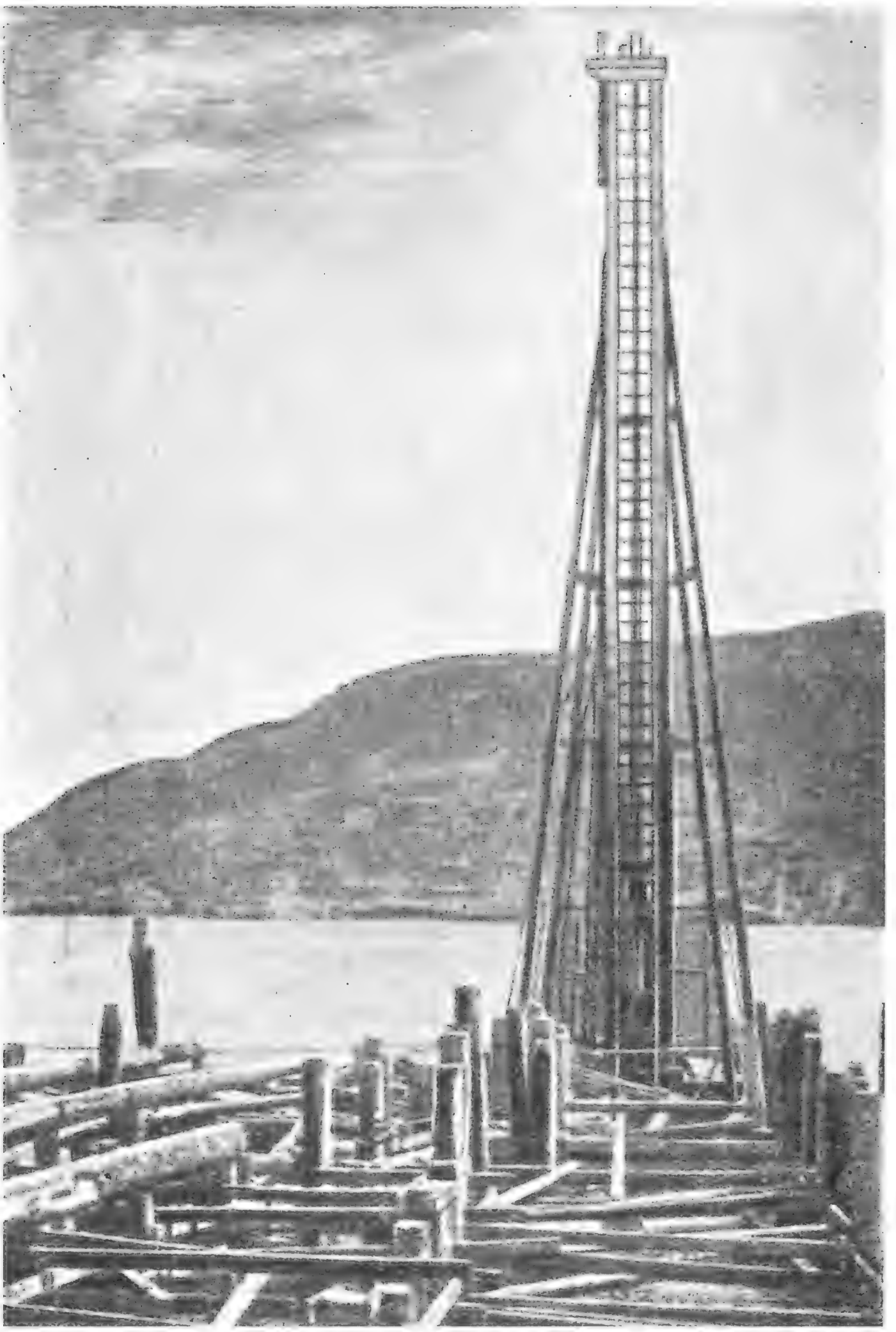
11. Мяч был подброшен вертикально вверх. Он оставался в воздухе в течение 6 сек. С какой скоростью вылетел он из рук? До какой высоты он поднялся? ($g = 0{,}8$ *см*^{2})

12. С какой скоростью надо подбросить мяч кверху, чтобы он достиг высоты памятника Вашингтону (190 *м*)? Через сколько времени он упадет назад?

13. С башни, высота которой равна 50 *м*, мяч брошен горизонтально со скоростью 35 *м/сек*. Найдите его траекторию, пренебрегая сопротивлением воздуха.

ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ НЬЮТОНА.

101. Первый закон: инерция. Всем известно, что, когда поезд останавливается, все находящиеся в нем предметы, вещи, люди стремятся упасть вперед; когда же поезд трогается после остановки —

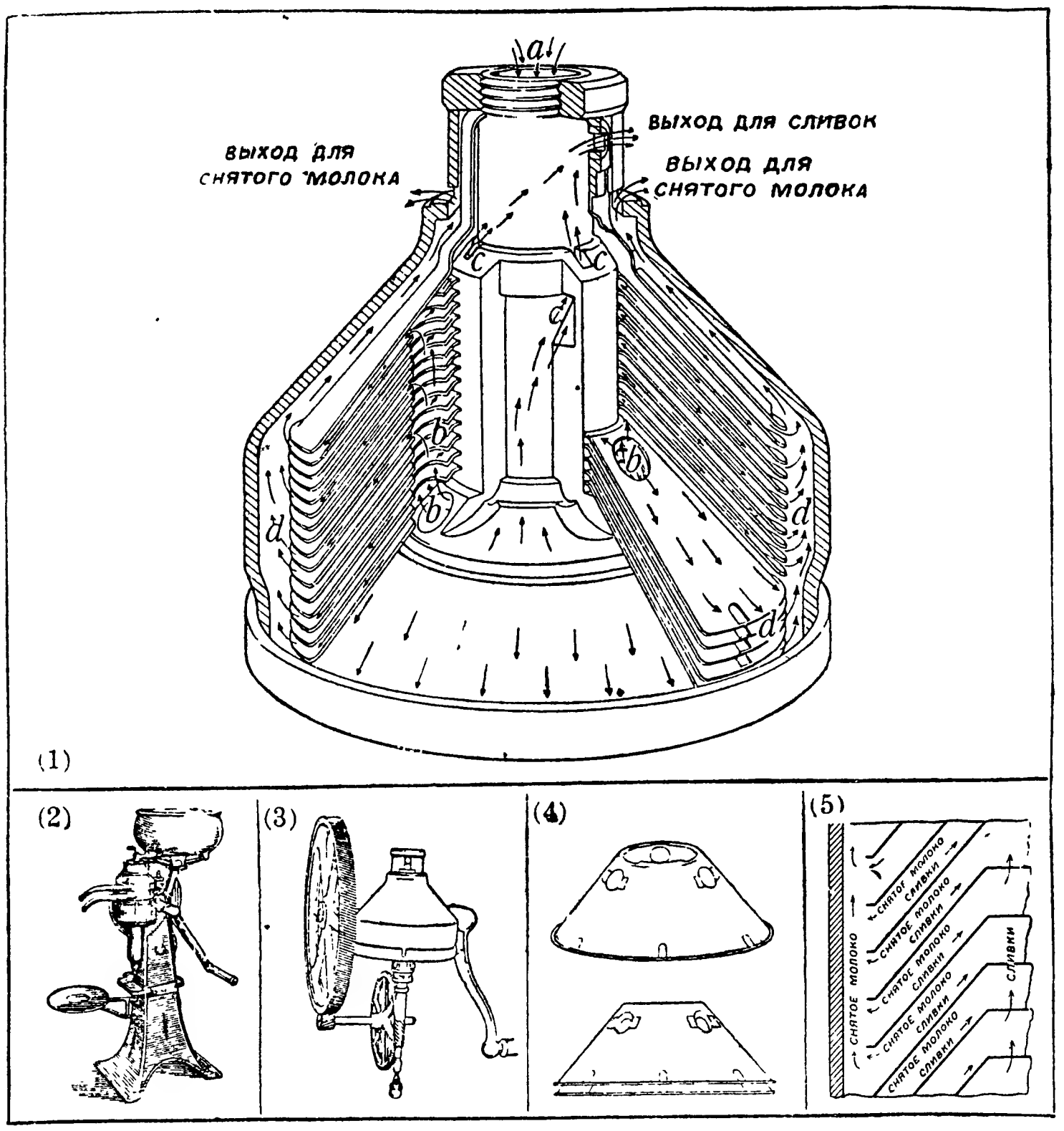


КОПЕР (СВАБЕОЙНАЯ МАШИНА)

все тела подаются назад. Другими словами, движущиеся тела стремятся продолжать двигаться, а покоящиеся стремятся оставаться в покое.

Далее; если с одинаковой силой толкнуть одинаковые бруски — один на льду, а другой на асфальтовой мостовой, то по льду брусок

прокатится на большее расстояние. Причину знает всякий: между бруском и мостовой трение больше, чем между льдом и бруском. Ну, а когда же остановилось бы тело, если бы трения вовсе не было?



СЕПАРАТОР.

Молоко наливается в центральную трубку [см. (1)] расположенную над гнездом с дисками (см. 1 и 4), находящимися внутри стального сосуда. Молоко течет вниз по центральной трубке, а затем поднимается по трем сериям отверстий (см. 1, в, в, в и т. д.) в гнездо с дисками, и распыляется на тонкие слои между дисками, разделенными небольшими промежутками. С помощью системы зубчатых колес (см. 3) диски и сосуд приводятся во вращение и совершают от 6 000 до 8 000 оборотов в минуту. В этих тонких слоях происходит быстрое отделение сливок от снятого молока. Молоко, как более тяжелое (вода, казеин, сахар) выбрасывается центробежной силой на н и ж н ю ю поверхность дисков (см. 3), затем стекает вниз к краям сосуда. (см. 1, d, d, d и т. д.) и, наконец, поднимается до отверстия, предназначенного для выпуска снятого молока. Более легкие сливки тем самым перемещаются внутрь и вверх вдоль в е р х н и х поверхностей дисков (см. 5), затем проходят через внутренние края дисков и отверстия (см. 1) с,с,с, на внешнюю сторону центральной трубки и, наконец, поднимаются до выпускного отверстия для сливок, расположенного над выпускным отверстием для молока. (см. 1 и 2.)

На это самый убедительный ответ дают астрономические наблюдения. В движении планет вокруг солнца по пустоте не обнаруживается ни малейшего замедления.

Более того. Комки грязи с вращающегося автомобильного колеса или вода с вертящегося жернова слетают в направлении касательной; когда автомобиль едет по кривой, нам самим приходится наклоняться к внутренней стороне, чтобы не выпасть из автомобиля. Таким образом, тела, как будто, стремятся сохранить не только количество движения, но и направление его (см. жирокомпас).

На основании такого рода наблюдений Исаак Ньютон в 1686 году высказал следующее утверждение, названное им первым законом движения:

Всякое тело остается в состоянии покоя или прямолинейного равномерного движения, пока внешние силы не выведут его из этого состояния.

Это присущее всякой материи свойство сопротивляться всякой попытке вывести ее из состояния покоя, остановить ее движение или как-нибудь изменить направление или количество ее движения,— называется инерцией.

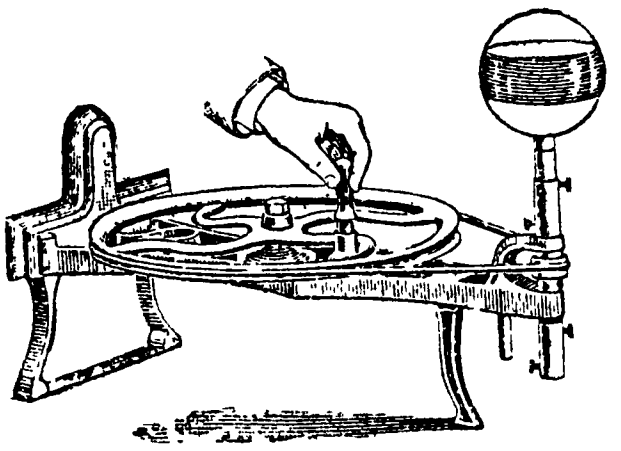


Рис. 84. Иллюстрация центробежной силы.

102. Центробежная и центростремительная сила. Только инерция не дает планетам упасть на солнце; инерция натягивает веревку, на которой мы вертим камень. Инерция заставляет отлететь по касательной камень, когда веревка рвется. Благодаря инерции вращающаяся жидкость стремится удалиться как можно дальше от оси вращения (рис. 84); благодаря инерции земной диаметр больше на экваторе, чем между полюсами; благодаря инерции иногда разрываются маховики, более тяжелое молоко отлетает в сепараторе дальше легких сливок и т. п.

Когда инерция проявляется в этом стремлении отдельных частей вращающейся системы отойти возможно дальше от оси вращения, ее называют центробежной силой. Инерция не есть настоящая сила. Это только инерциальное противодействие с ле, притягивающей тело к центру.

Во всякой вращающейся системе стремлению отдельных частей отделиться возможно дальше от центра противодействует сила, направленная к центру. Так, например, земля не отлетает в пространство по касательной благодаря силе притяжения солнца. Такая сила, направленная внутрь системы, к центру, возникает во всякой вращающейся системе и называется центростремительной.

103. Момент. Количество движения движущегося тела определяется как произведение массы тела на его скорость. Обычно его называют моментом. Так, например, пуля массой в 10 *г*, движущаяся со скоростью 50 000 *см* в сек., обладает 500 000 единиц момента. Копер (сваебойная машина), весящий 1 000 *кг* и движущийся со скоростью 1 000 *см* в сек., имеет 1 000 000 000 единиц момента

и т. д. мы всегда будем выражать моменты в *CGS* — единицах, т. е. в граммах, умноженных на *см* в секунду.

104. В т о р о й з а к о н д в и ж е н и я. Земля притягивает 2 *г* массы вдвое сильнее, чем 1 *г* массы. Однако при свободном падении обе массы приобретают в одну секунду одинаковые скорости. Следовательно, в данном случае, м о м е н т ы о б о и х т е л в т о ч н о с т и п р о п о р ц и о н а л ь н ы с и л а м, в ы з в а в ш и м д в и ж е н и е т е л. Оказывается, это имеет место во всех тех случаях, когда силы просто преодолевают сопротивление инерции. Так, например, если толкнуть автомобиль по гладкому пути, трением которого можно пренебречь, с силой в 1 500 *кг*, то приращение его скорости, а следовательно и момента в секунду вдвое больше, чем при силе в 750 *кг*. На этом основании второй закон Ньютона гласит:

Б ы с т р о т а и з м е н е н и я м о м е н т а п р о п о р ц и о н а л ь н а д е й с т в у ю щ е й с и л е, п р и ч е м н а п р а в л е н и е и з м е н е н и я м о м е н т а с о в п а д а е т с н а п р а в л е н и е м с и л ы.

105. Третий закон движения. Всем известно, что, когда человек выскакивает из лодки на берег, лодка испытывает обратный толчок. Выстрел из ружья вызывает «отдачу». При столкновении двух бильярдных шаров, один шар теряет свою скорость, т. е. отлетает назад, в то время как другой летит вперед. Сделаем простой опыт, показывающий, как можно количественно изучить такого рода эффекты.

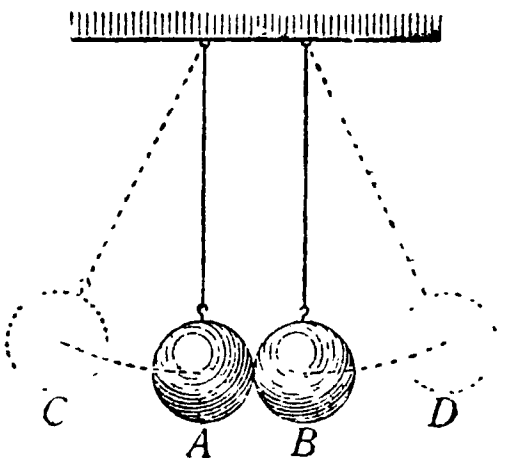


Рис. 85. Иллюстрация третьего закона.

Дадим стальному шарику *A* (рис. 85) упасть из положения *C* до столкновения с шариком *B*. В момент столкновения *A* потеряет, практически всю свою скорость, а *B* перейдет в положение *D*, симметричное с *C*. Следовательно, скорость, приобретенная *B*, почти в точности равна скорости *A* до столкновения. Эти скорости были бы совершенно точно равны, если бы шары были идеально упругие. Экспериментально удалось установить, что момент, приобретенный *B*, плюс момент, оставшийся у *A*, в точности равен моменту *A* до столкновения. Значит, момент *B* в точности равен моменту, потерянному *A*. Но, согласно второму закону, изменение момента пропорционально действующей силе. Значит, наш опыт показал, что шар *A* т о л к н у л ш а р *B* с т о ч н о т а к о й ж е с и л о й, к а к *B* т о л к н у л *A*.

Сущность третьего закона Ньютона состоит в следующем утверждении: масса человека, выскочившего из лодки, умноженная на его скорость, равна массе лодки, умноженной на ее скорость. Точно так же масса пули, умноженная на ее скорость, равна массе ружья, умноженного на его скорость. Справедливость такого утверждения была проверена на множестве самых различных опытов. Ньютон формулировал свой третий закон так:

В с я к о е д е й с т в и е в ы з ы в а е т р а в н о е с е б е и п р о т и в о п о л о ж н о е п р о т и в о д е й с т в и е.

Так как сила измеряется быстротой изменения момента, то можно это попросту выразить так: к о г д а к а к о е - н и б у д ь т е л о п р и о б р е т а е т н е к и й м о м е н т, н е к о т о р о е д р у г о е т е л о п р и о б р е т а е т р а в н ы й и п р о т и в о п о л о ж н ы й м о м е н т.

Вначале трудно уяснить себе, что, приводя в движение какое-нибудь тело, мы всегда сообщаем другому телу равный и противоположный момент. Например. Поставим ружье на землю и выстрелим из него кверху. Мы увидим только движение пули. Другим телом в данном случае является земля, и момент ее равен моменту пули. Однако в виду громадной массы земли скорость ее бесконечно мала.

106. Дина. Мы видели, что грамм силы несколько меняется в зависимости от места на земле. Поэтому для научных исследований было признано более удобным принять второй закон Ньютона за основу для определения новой единицы силы. Эту единицу называют абсолютной или CGS = единицей, так как она основана на фундаментальных единицах длины, массы и времени и не зависит поэтому от тяготения. Название этой единицы — дина. Дина определяется как сила, которая, действуя в течение 1 секунды на любую массу, сообщает ей единицу момента. Или иначе: дина — это сила, которая, действуя в течение 1 секунды на массу в 1 *г*, вызывает и з м е н е н и е скорости этой массы, равное 1 *см* в сек.

107. Грамм силы эквивалентен 980 динам. Грамм силы, по нашему определению, есть действие земного притяжения на 1 *г* массы. Так как земное притяжение каждую секунду сообщает 1 *г* массы скорость в 980 *см* в сек. (т. е. 980 единиц момента), а сила в 1 дину сообщает в 1 сек. 1 единицу момента, — ясно, что грамм силы эквивалентен силе в 980 дин.

Значит, дина — очень маленькая единица. Она примерно равна силе, с которой земля притягивает кубический миллиметр воды.

108. Алгебраическое выражение второго закона Ньютона. Положим, что сила F действует в течение t секунд на массу в m *г* и что при этом приращение скорости этой массы равно v *см* в сек. Момент, сообщаемый телу силой F за время t, есть mv. Значит, в одну секунду тело приобретает момент $\frac{mv}{t}$ Сила, выраженная в динах, эквивалентна моменту, сообщенному в одну секунду. Отсюда имеем:

$$F = \frac{mv}{t} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

Но $\frac{v}{t}$ есть приращение скорости в 1 сек., т. е. ускорение — a. Значит, формулу (8) можно переписать так:

$$F = ma. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

Ур-ие (9) дает алгебрическое выражение нашего утверждения, что сила измеряется быстротой изменения момента. Приведем пример. Паровоз тащит поезд, масса которого 2 000 000 *кг*. Через 30 сек. поезд приобретает скорость 60 *см* в сек. Значит, паровоз тащил с силой в $2\,000\,000\,000 \times \frac{60}{30} = 4\,000\,000\,000$ дин. Чтобы перевести это выражение в граммы, надо разделить его на 980; дальнейшее деление на 1 000 даст выражение этой силы в килограммах. Отсюда получаем, что паровоз тащит поезд с силой в $\frac{4\,000\,000\,000}{980\,000} = 4081$ *кг*, т. е. 4,081 метрической тонны. Очевидно формулы (8) и (9) годятся только тогда, когда величины выражены в абсолютных единицах.

Резюме. **Т р и з а к о н а д в и ж е н и я Н ь ю т о н а.**

Первый закон. Всякое тело пребывает в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, пока внешние силы не заставят его выйти из этого состояния.

Второй закон. Быстрота изменения момента пропорциональна действующей силе, причем изменение момента происходит в направлении силы.

Третий закон. Всякое действие вызывает равное и противоположное ему противодействие.

Момент = mv = произведению массы на скорость.

Абсолютная *CGS* единица силы есть сила, которая, действуя в течение 1 сек. на единицу грамм-массы, вызывает изменение скорости этой массы, равное 1 *см* в 1 сек. Эта сила называется диной. В *CGS* единицах второй закон Ньютона выражается следующей формулой:

$$F = \frac{mv}{t} = ma.$$

Вопросы и задачи.

1. В чем проявляется инерция, когда человек на ходу выскакивает из трамвая спиной к ходу?

2. Разберите все проявления инерции при игре в мяч.

3. Объясните с помощью второго закона Ньютона, почему паровозу труднее привести поезд в движение, чем тащить поезд, уже идущий полным ходом.

4. Пользуясь алгебраическим выражением второго закона Ньютона, объясните, почему быстро летящий мяч больнее поймать напряженными руками и не так больно, когда руки совершенно эластичны.

5. Какой принцип лежит в основе следующих действий: для укрепления головки молотка на ручке, один раз (1) молоток сильно ударяют внешним концом ручки о наковальню, и (2) внешний конец ручки сильно ударяют другим молотком.

6. Поезда A, B и C — все идут с одинаковой скоростью 60 *км* в час (рис. 86). Какова относительная скорость A и B? C и A?

7. Почему вагончик C (рис. 87) не падает? Какая сила двигает его от B до D?

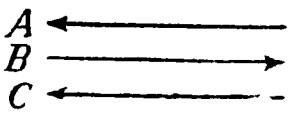


Рис. 86

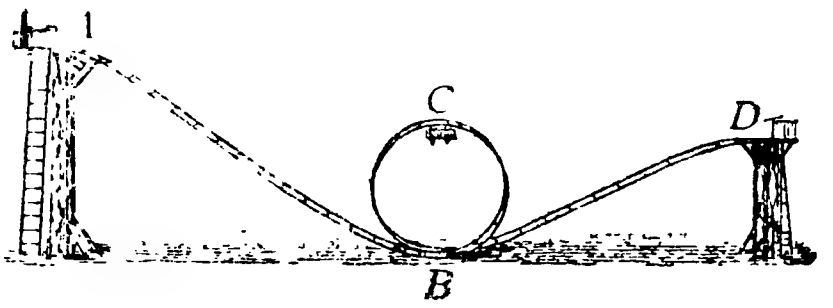


Рис. 87.

8. Почему маховик заставляет машину двигатья более равномерно? (см. стр. 174).

9. Уравновесьте на пальце кусочек картона и положите на него монету. Затем быстро вытащите картон из-под монеты, так чтобы монета осталась уравновешенной на пальце. Какой принцип проявился здесь?

10. Подвесьте груз на веревке. Привяжите кусок такой же веревки к нижней части груза. Если резко дергать за нижнюю веревку, она порвется. Если же тянуть ее равномерно, порвется верхняя. Объясните.

Рис. 88. Гидравлический таран.

11. Разберите, где тело весит больше — на полюсах или на экваторе. Приведите два соображения.

12. Почему в наезженной колее на закруглениях образуются насыпи?

13. Как изменился бы вес тел на экваторе, если бы земля перестала вращаться вокруг своей оси? Объясните.

14. Разберите с точки зрения третьего закона Ньютона устройство пружинных весов.

15. Современные сушилки для белья представляют собой большие цилиндры с отверстиями по бокам. В цилиндры помещается мокрое белье. Затем цилиндры приводятся в быстрое вращение. Объясните, почему.

16. Объясните, каким образом сопротивление тяге движет океанские пароходы и аэропланы?

17. Гидравлический таран (рис. 88) — великолепный практический пример инерции. С его помощью можно поднять воду из пруда P в резервуар, стоящий выше уровня пруда. Объясните, пользуясь рис. 89, устройство тарана. Следует помнить, что клапан V не открывается, пока притекающая к нему струя воды не станет достаточно быстрой.

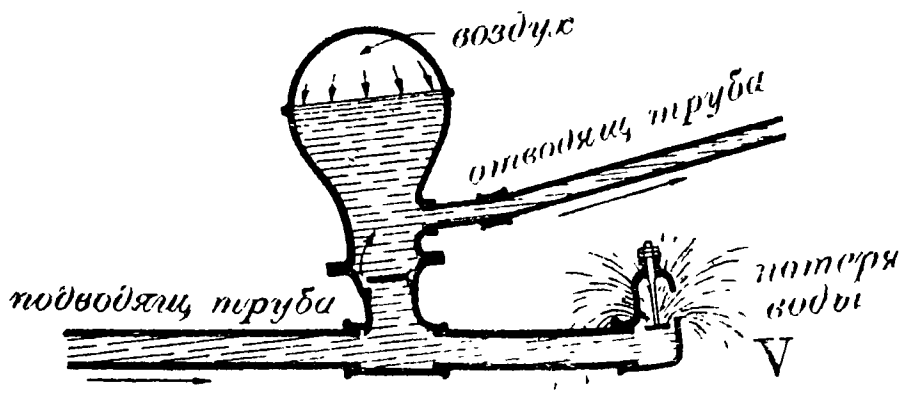


Рис. 89.

18. Если бы два человека очутились посередине идеально г л а д к о г о (не имеющего трения) ледяного поля, могли бы они выбраться оттуда? Смог бы выбраться один человек, попавший туда?

19. Винтовка весит 2,5 *кг*, из нее вылетает пуля весом в 5 *г* со скоростью 30 *м/сек*. Какова будет скорость винтовки в противоположном направлении? (Воспользуйтесь третьим законом Ньютона.)

20. Сила в 1 дину действует в течение 3 сек. на массу в 1 *г*. Какую скорость приобретет эта масса?

21. Сила в 1 дину действует на 1 *г* в течение 1 сек. Какой путь пройдет этот грамм к концу первой секунды?

ГЛАВА VI.

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ СИЛЫ.

УПРУГОСТЬ. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ СИЛЫ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ.

109. Прочность. Целый ряд простейших явлений природы доказывает, что молекулы твердого тела связаны друг с другом весьма большими силами сцепления. Твердые тела не только не распространяются во все стороны, как газы; напротив, чтобы разъединить молекулы твердого тела, часто необходимо применить огромные силы. Так, напр., чтобы разорвать стальной стержень диаметром в 1 *см*, надо нагрузить его весом, превышающим 7,8 *т*.

В следующей таблице приведены в *кг* веса, необходимые для разрыва проволоки из разных материалов, сечением в 1 *кв. мм*. Это — так называемые относительные п р о ч н о с т и проволоки.

Свинец	2,6	Платина . . .	43	Железо	77
Серебро . . .	37	Медь	51	Сталь	91

110. Упругость. Мы можем подробнее изучить силы сцепления, действующие между молекулами различных веществ, нагружая проволоки весами, слишком малыми для разрыва их.

Подвесим, например, к потолку на крючке длинную стальную проволоку. Нижний конец проволоки накрепко закрутим вокруг конца одноме трового

стержня, как на рис. 90. Установим подставку c, чтобы она приходилась как раз против нарезки в стержне на расстоянии около 5 *см* от точки прикрепления проволоки. Снабдим другой конец стержня стрелкой, оканчивающейся как раз против вертикальной зеркальной шкалы S. Груз P должен быть достаточно велик, чтобы слегка натянуть проволоку. Будем отмечать показания стрелки p на шкале S. Будем последовательно прибавлять к p 3 или 4 гири в 1 *кг* и запишем соответствующие показания стрелки. Будем затем по одной снимать гири с p. По всей вероятности, при этом стрелка последовательно пройдет через все предыдущие показания и возвратится в точности в начальное положение.

Это свойство стали принимать после удаления растягивающего груза первоначальную длину в большей или меньшей степени принадлежит всем твердым телам. Называется оно упругостью.

111. Предел упругости. Если приложить к проволоке на рис. 90 достаточно большой груз, стрелка после удаления груза не возвратится в точности в первоначальное положение. Говорят поэтому, что сталь совершенно упруга, только пока деформирующая сила не превосходит известного предела. За этим пределом у стали уже не наблюдается совершенной упругости.

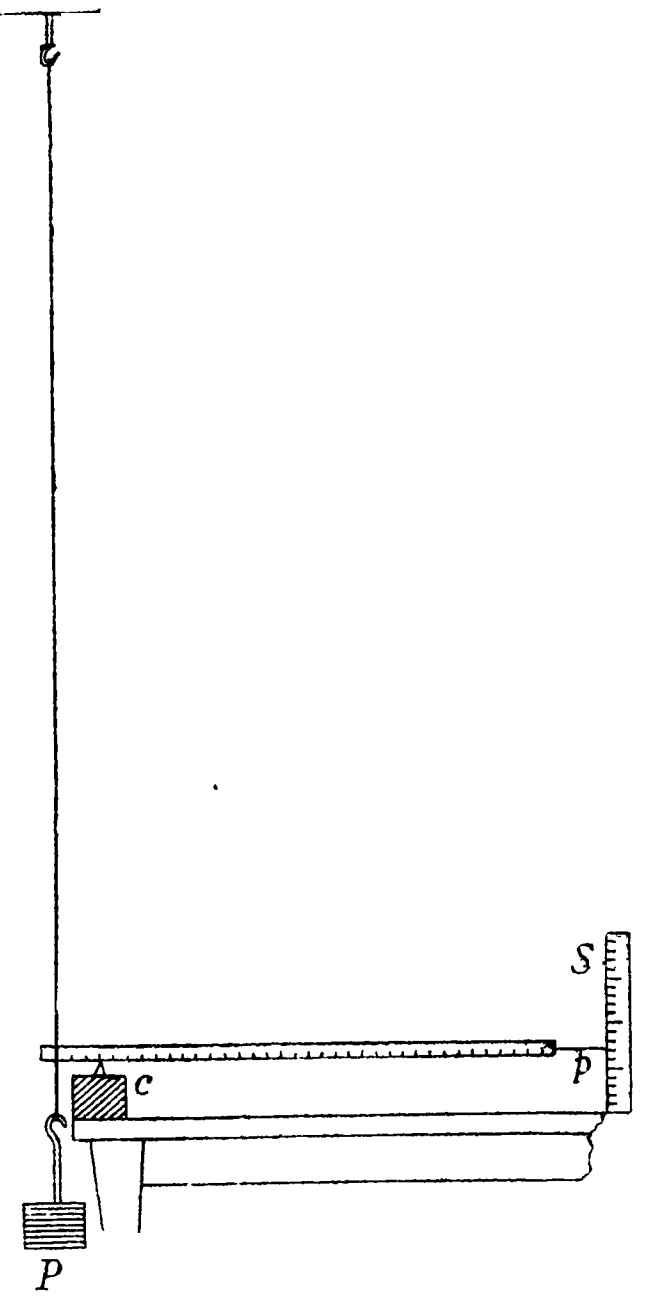


Рис. 90. Упругость стальной проволоки.

Для различных веществ предельная деформация, после которой она теряет совершенную упругость, весьма различна.

112. Закон Гука. На опыте § 110 (рис. 90) можно убедиться, что растяжения, производимые при последовательных прибавках в 1 *кг*, равны между собой, по крайней мере в пределах точности наблюдения. Равные приращения растягивающей силы вызывают равные растяжения. Весьма тщательные опыты показали, что этот закон оправдывается с большой точностью при самых различных упругих деформациях в тех случаях, и только в тех случаях, когда не перейден предел совершенной упругости. Этот закон называется законом Гука, в честь английского ученого Роберта Гука (1635 — 1703). Закон этот можно формулировать и таким образом:

Когда не превзойден предел совершенной упругости, то все упругие деформации — будь то кручение, гнутие или растяжение — прямо пропорциональны вызвавшим их силам.

Обыкновенные пружинные весы (рис. 55) — иллюстрация закона Гука.

113. Силы сцепления. Из предыдущих опытов выяснилось, что молекулы одного сорта притягивают друг друга, во всяком случае — в твердых телах. Разнородные молекулы тоже взаимно притяти-

ваются. Это видно из того, что клей с невероятной прочностью пристает к дереву, бетон — к кирпичу, слой никкеля — к железу и т. д. Силы, связывающие между собой молекулы, называются силами сцепления.

Резюме. **Закон Гука. Когда не превзойден предел совершенной упругости. деформации прямо пропорциональны вызвавшим их силам.**
Между молекулами твердых тел действуют силы сцепления.

Вопросы и задачи.

1. Чтобы разорвать данную проволоку, необходим такой-то вес. Какая сила потребна для разрыва двух таких проволок, висящих рядом? для разрыва одной проволоки с вдвое большим диаметром?
2. Почему пружины делают чаще из стали, чем из меди?
3. Если отметить положения стрелки пружинных весов без нагрузки и затем при нагрузке в 10 *г* и разделить расстояние между двумя стрелками на 10 равных частей — будет ли каждая из этих частей соответствовать 1 *г*? Почему?
4. Сломанный брусок наклепанного железа или стали можно срастить, нагревая сломанные концы добела и прижимая их друг к другу под большим давлением. Золотая фольга сращивается в холодном виде, когда дантист заполняет ею зуб. Объясните это сращение.
5. Сломанный кусок дерева можно склеить клеем. В чем заключается действие клея?

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ СИЛЫ В ЖИДКОСТЯХ. КАПИЛЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ.

114. Доказательство существования молекулярных сил в жидкостях. Легкость, с которой жидкости меняют свою форму, может навести на мысль, что между их молекулами почти не действуют силы сцепления. Однако простой опыт заставит нас убедиться, что это далеко не так.

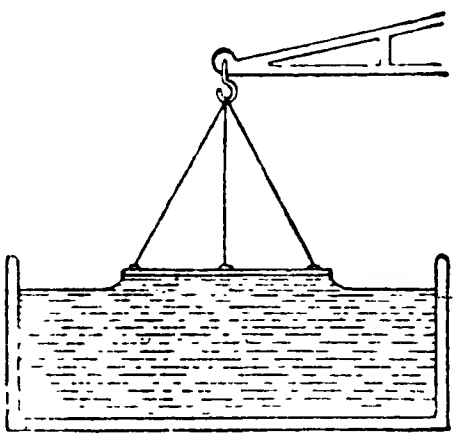


Рис. 91. Силы сцепления в воде.

С помощью воска и веревки на одном из коромысел весов горизонтально подвесим стеклянную пластинку, как показано на рис. 91, и уравновесим ее. Поместим сосуд с водой так, чтобы поверхность воды приходилась непосредственно под пластинкой. Толкнем коромысло и заставим пластинку соприкоснуться с водой. Оказывается, на другую чашку весов приходится дополнительно положить довольно значительный груз, чтобы оторвать пластинку от воды. При этом на пластинке остается слой воды. Значит, добавочную силу пришлось приложить для того, чтобы оторвать молекулы воды от молекул воды же, а не для отделения воды от стекла. Аналогичные опыты могут быть произведены со всеми жидкостями. Если делать такой опыт со ртутью, оказывается, что ртуть не смачивает стекло. Значит, сила сцепления внутри ртути сильнее, чем силы сцепления между молекулами ртути и стекла.

115. Форма жидкости, не подверженной никаким силам. Итак, каждая молекула жидкости притягивает все другие ее молекулы. Следовательно, жидкость, на которую не действуют никакие внешние силы, а только ее собственные силы сцепления, должна стремиться сжаться до наименьшей поверхности, возможной при данном объеме. Это очевидно. Раз каждая молекула на поверхности жидко-

сти притягивается внутренними молекулами, эти поверхностные молекулы должны приближаться к центру, пока жидкость не приняла наиболее компактную из всех возможных форм. Известно, что при данном объеме наименьшей поверхностью обладает сфера. Следовательно, если бы мы могли избавить некоторую массу жидкости от действия тяготения и других внешних сил, эта жидкость сразу же приняла бы форму идеальной сферы. Это заключение легко проверить на опыте.

Нальем в большой плоскостенный сосуд воды, а поверх нее спирта. Затем пипеткой введем каплю масла в нижнюю часть слоя спирта. Масло примет форму идеальной сферы и будет в равновесии внутри жидкости (рис. 92).

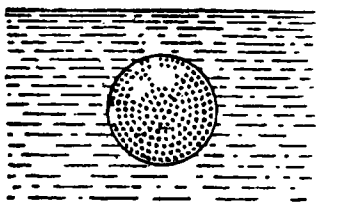


Рис. 92. Сферическая капля масла, не подверженная силе тяжести.

Обыкновенно жидкости не принимают сферической формы, так как силы тяжести, будучи больше сил сцепления, больше влияют и на форму жидкости. Это подтверждается хотя бы тем, что при уменьшении количеств жидкости, когда соответственно уменьшается и действие на них силы тяжести, жидкость все более и более стремится принять форму сферы. Так, например, мелкие капельки ртути — почти идеальной сферической формы, мелкие капли дождя и вообще маленькие уравновешенные частицы любой жидкости очень близки к форме сферы.

116. Сжимаемость жидких пленок. Поверхностное натяжение. Сжимаемость жидких пленок легко объяснить стремлением жидкости принять наименьшую из всех возможных поверхностей.

Выдуем из трубки мыльный пузырь в 5 или 6 *см* в диаметре и оставим его на краю трубки. Пузырь сразу сморщится и через несколько минут будет втянут в трубку. Дело тут в том, что жидкая пленка пузыря стремится довести свою поверхность до минимума. А это стремление, как мы уже видели, объясняется взаимным притяжением молекул жидкости. Если около другого конца трубки держать свечу, то пламя ее отклонится под влиянием струи воздуха, идущего в трубку из сжимающегося пузыря. Сделаем другой опыт. Привяжем нитяную петлю к колечку из проволоки, как показано на рис. 93. Опустим колечко в мыльную воду. Тогда внутри него натянется мыльная пленка. Затем горячей проволокой прорвем пленку внутри петли. В виду стремления пленки вне петли сократиться, петля немедленно примет форму идеального круга (рис. 94). Почему эта петля примет именно форму круга? Дело в том, что пленка вне петли стремится приобрести наименьшую поверхность. Ясно, что площадь внутри петли должна в таком случае сделаться возможно больше. А фигура, имеющая наибольшую площадь при данном периметре, есть, как известно, круг.

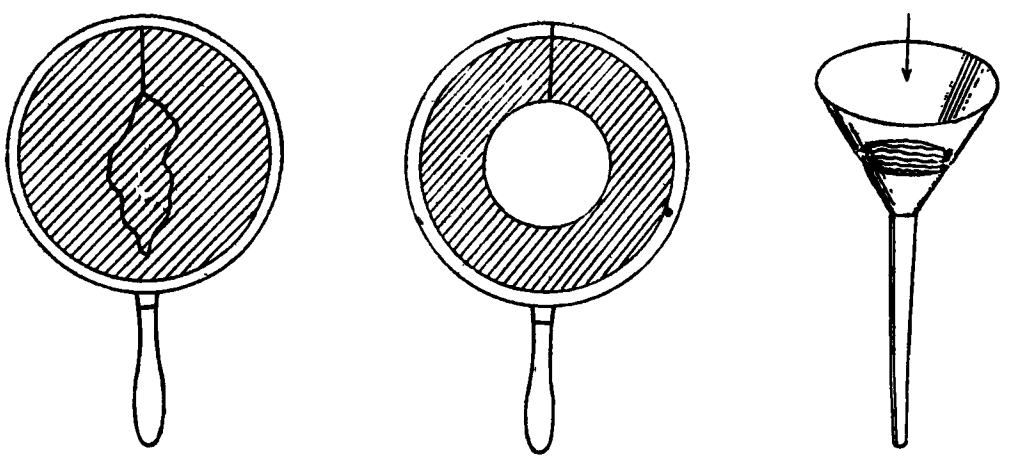


Рис. 93. Рис. 94. Рис. 95.
Сжимаемость мыльной пленки.

Натянем мыльную пленку на горлышке чистой 5-сантиметровой воронки (рис. 95). Стремление пленки сузиться будет достаточно велико, чтобы противодействовать силе тяжести и приподнять воронку.

Стремление жидкости уменьшить свою свободную поверхность, т. е. **стремление всякой жидкой поверхности принимать характер натянутой упругой пленки, называется поверхностным натяжением.**

Рис. 96 иллюстрирует упругость жидкой пленки. Этот рисунок

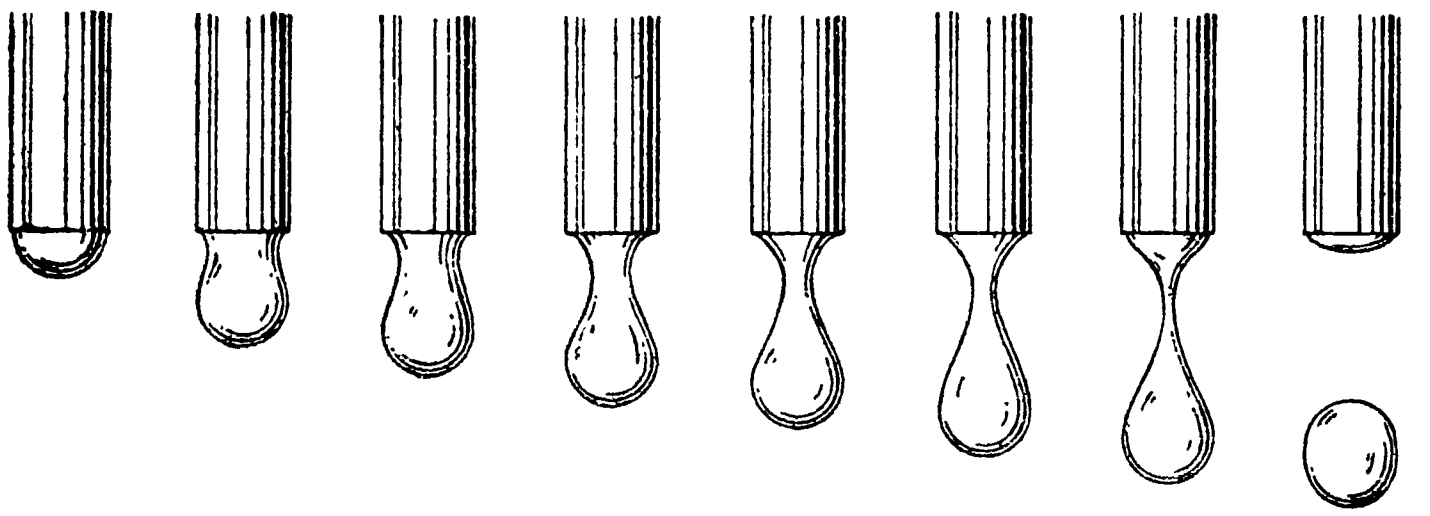


Рис. 96. Некоторые стадии, через которые проходит медленно образующаяся капля.

оделан по кинофильме, показывающей различные стадии, через которые проходит медленно-образующаяся капля. Внешние слои молекул ведут себя как упругий мешок, в котором держится вся остальная жидкость.

117. Подъем и опускание уровня жидкостей в капиллярах (волосность). В главе II было показано, что уровни жидкостей в любом количестве сообщающихся сосудов, вообще говоря, одинаковы. Следующий опыт покажет, что правило это перестает быть верным, когда диаметр трубки достаточно мал.

Установим ряд капиллярных трубок, диаметр которых меняется в пределах от 2 до 1 *мм*, как показано на рис. 97.

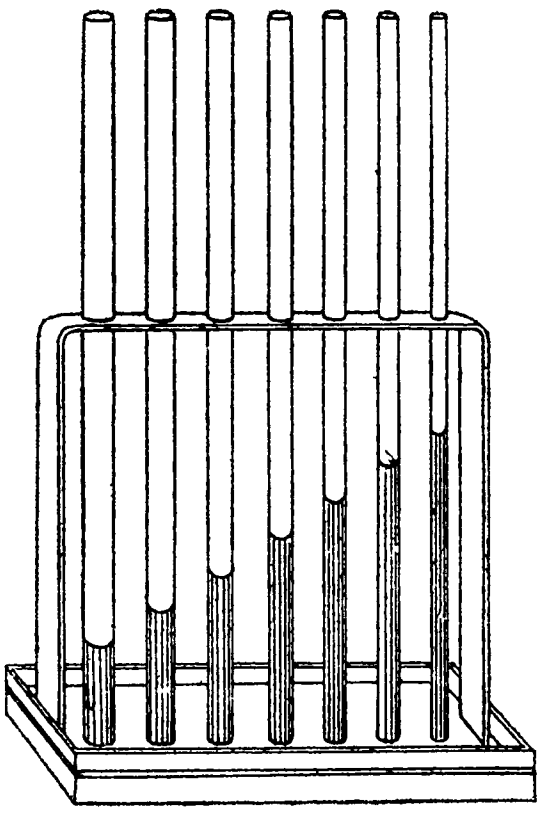


Рис. 97. Подъем жидкостей в капиллярных трубках.

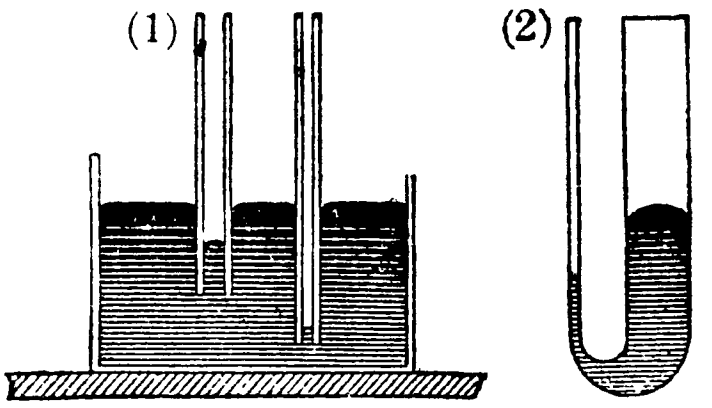


Рис. 98.

Затем нальем в сосуд воды или чернил. Уровень жидкости в трубках будет выше, чем в сосуде, причем, чем уже трубка, тем выше стоит в ней жидкость. Если вместо воды взять ртуть, картина получится совершенно обратная. Ртуть во всех трубках опускается, причем опускани тем больше, чем уже трубка [рис. 98 (1)]. Это опускание легче всего проследить на U образной трубке, как на рис. 98 (2).

Из опытов были найдены следующие законы:

1. Если жидкость смачивает капилляр, она поднимается в нем; если же не смачивает его, она опускается.

2. Подъем в одном случае и опускание в другом — обратно пропорциональны диаметрам трубок.

Заметим еще, что поверхность жидкости, поднимающейся в капилляре, вогнутая; а жидкости опускающейся — выпуклая.

118. Причина искривления поверхности жидкости в капилляре. Все явления, рассмотренные в предыдущем параграфе. можно объяснить действием сил сцепления. При этом следует помнить два хорошо известных факта:

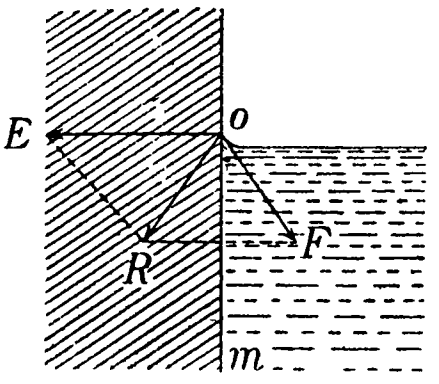


Рис. 99.

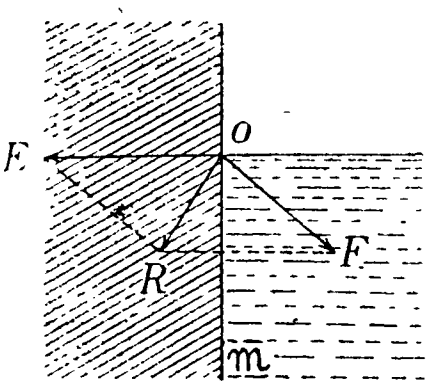


Рис. 100.

Условия, при которых жидкость поднимается около стенки сосуда.

1. Поверхность покоящейся жидкости (напр., поверхность пруда) перпендикулярна равнодействующей приложенных к ней сил (т. е. силе тяготения).

2. Для маленьких количеств жидкости сила тяжести исчезающе мала по сравнению с внутренними силами сцепления, и ею можно пренебречь (см. § 115).

Рассмотрим очень маленький объем жидкости вокруг точки O (рис. 99), в которой вода касается стеклянной стенки трубки. Положим, что рассматриваемое количество жидкости настолько малое, что можно пренебречь действием силы тяжести. Силы сцепления между молекулами жидкости и стенки тянут частички жидкости из O по направлению OE. Силы сцепления самой жидкости тянут эти же самые частички в направлении OF. Равнодействующая этих двух сил пойдет в направлении OR (рис. 99), как легко видеть из правила параллелограмма (глава V). Пусть равнодействующая OR силы OE и силы OF лежат слева от вертикали Om (рис. 100). Поверхность жидкости всегда перпендикулярна к равнодействующей, поэтому жидкость должна подняться относительно стенки. Пример — вода в стеклянной трубке.

Когда же сила OF (рис. 101) сильна по сравнению с силой OE, равнодействующая OR опустится справа от вертикали. В этом случае жидкость в точке O опустится. Такие жидкости не смачивают стенок.

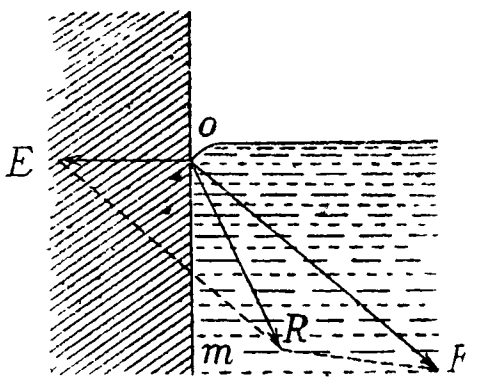
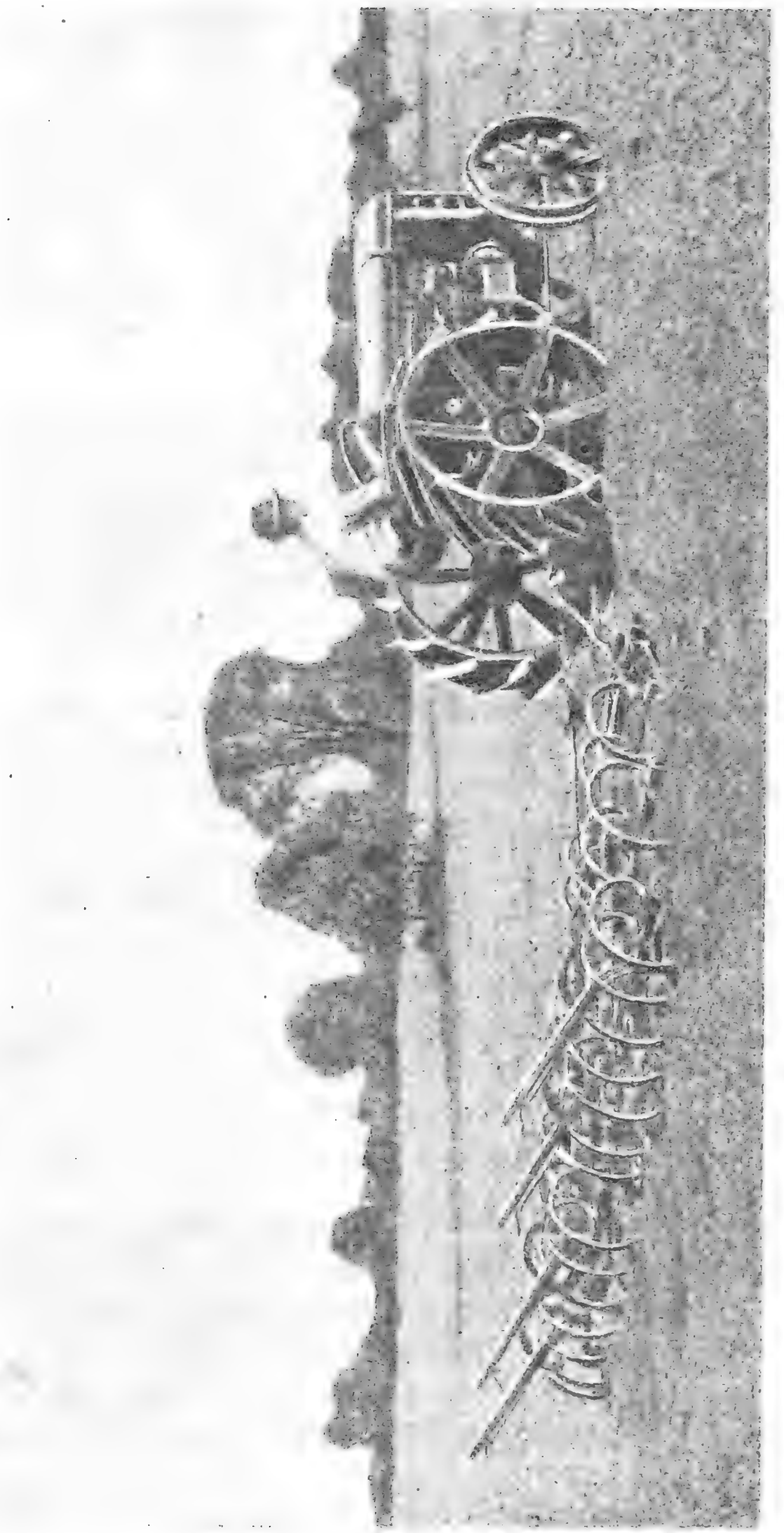


Рис. 101.

Итак, подъем и опускание жидкости около стенок зависят только от соотношения сил сцепления между молекулами жидкости и стенки и сил сцепления самой жидкости. Так как ртуть не смачивает стекла, можно заключить, что в ней силы сцепления относительно велики; значит, можно ожидать, что ртуть опустится около стеклянных стенок сосуда или в стеклянной трубке. Опыт показывает, что это действительно так. Вода смачивает стекло. Это значит, что здесь силы сцепления между стеклом и водой относительно сильнее. Следовательно, вода

должна подниматься около стенок сосуда. Так оно и есть на самом деле.

Ясно, что поверхность жидкости, опускающейся около вертикальных стенок сосуда, внутри трубки будет в ы п у к л о й, а по-



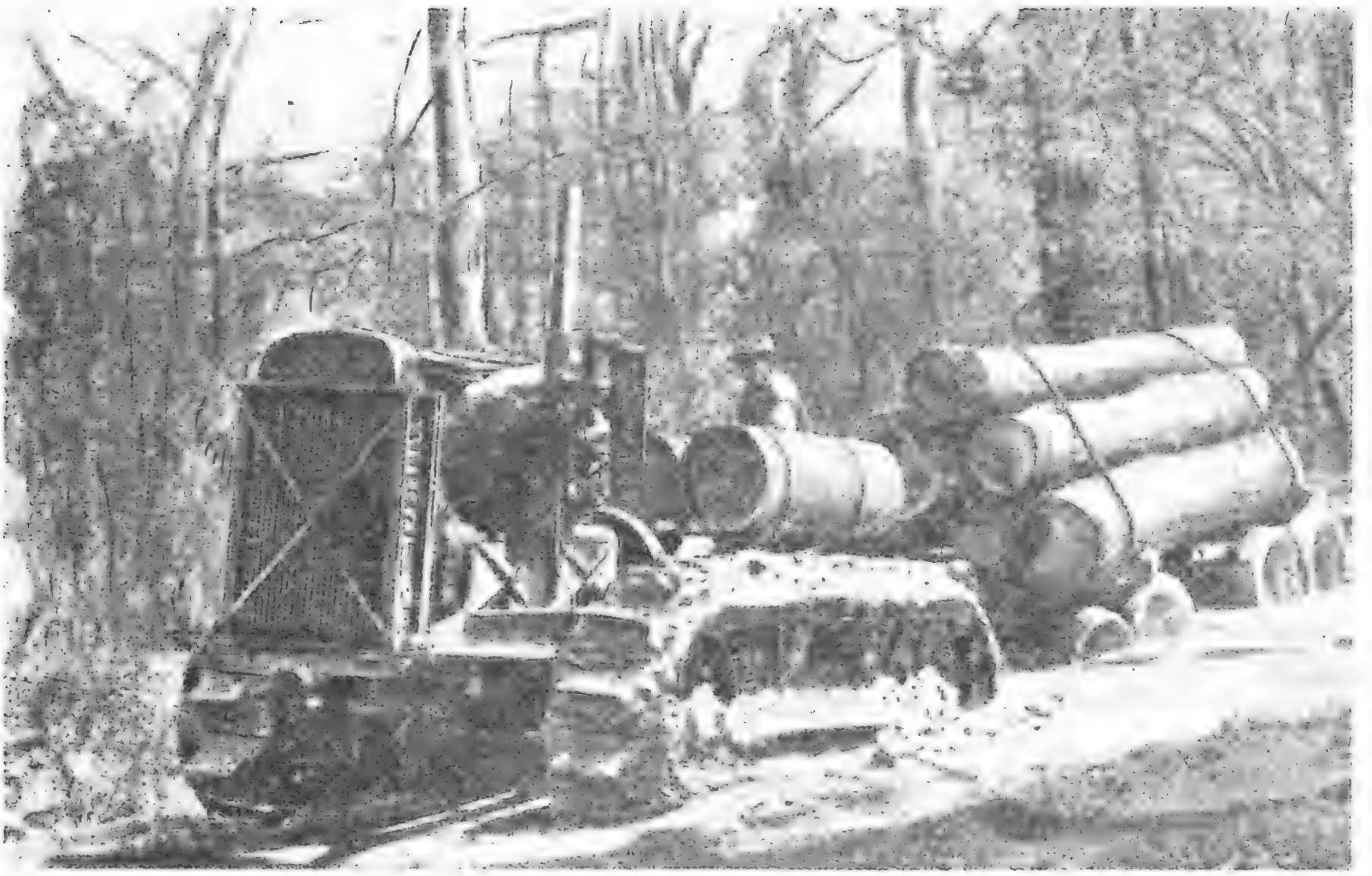
НЕБОЛЬШОЙ СЕЛЬСКО-ХОЗЯЙСТВЕННЫЙ ТРАКТОР

Тракторы широко применяются для пахоты. Пахота трактором подготовляет почву к приему влаги и к удержанию ее, уменьшая быстроту испарения. Вследствие размельчения твердой, плотной поверхности на мелкие части, уменьшается испарение влаги, поднимающейся под влиянием капиллярности на поверхность.

верхность поднимающейся около стенок жидкости будет в о г н у т о й.

119. Объяснение подъема и опускания жидкости в капиллярах. Положим, что в капиллярной трубке поверхность жидкости *aob* вогнутая (рис. 102). Вследствие поверхностного натяжения поверх-

ность стремится выпрямиться и принять вид ao^1b. Но стоит ей только выпрямиться, как силы сцепления опять заставят края жидкости



ГУСЕНИЧНЫЙ ТРАКТОР.

Гусеничный трактор обладает громадной мощностью и не скользит на льду и на снегу. Этот вид тракторов все более и более широко применяется для перевозки бревен, не только вследствие его мощности, но еще вот почему: он предохраняет леса и почву от разрушений, которые вызвала бы постоянная потеря влаги вследствие капиллярного действия почвы и растительности.

подняться. Таким образом жидкость будет подниматься в трубке пока вес поднятого объема *ambn* жидкости (рис. 103) не уравно

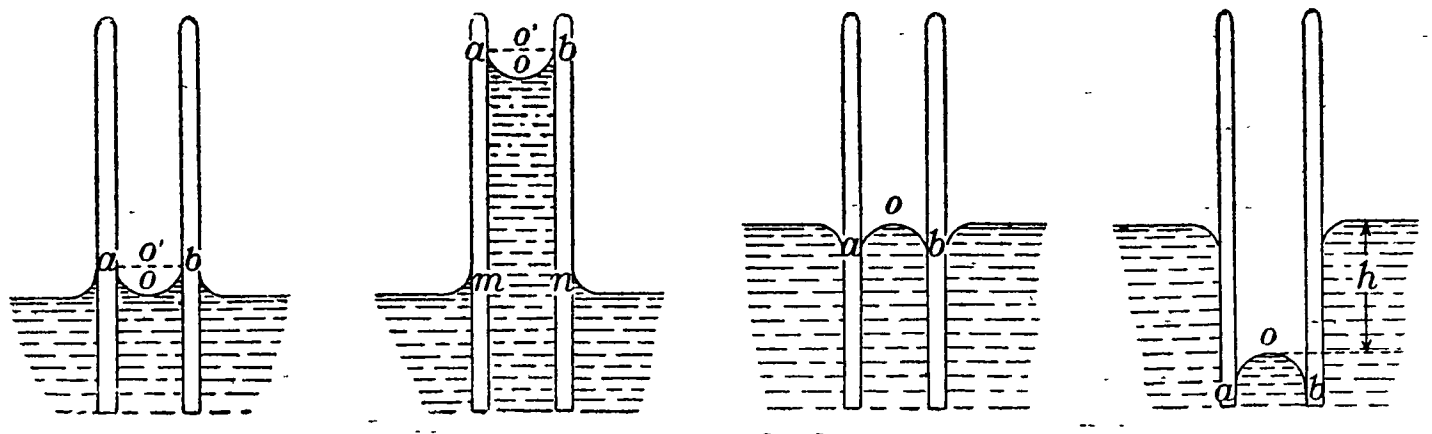


Рис 102. Рис. 103. Рис. 104. Рис. 105.

Вогнутый мениск вызывает подъем жидкости в капилляре.

Выпуклый мениск вызывает опускание жидкости в капилляре.

весит стремление поверхности *aob* к выпрямлению. Ясно, что в такой трубке жидкость поднимается выше, чем в толстой: вес столба поднимаемой жидкости в тонкой трубке меньше.

Выпуклая поверхность ртути *aob* (рис. 104) опускается, пока давление ртути снизу вверх, зависящее от высоты h, не уравновесит стремления поверхности *aob* к выпрямлению.

120. Капиллярные явления в обыденной жизни. В природе и в обыденной жизни капиллярные явления играют очень большую роль. Так, например, масло поднимается в фитилях ламп, полотенце опущенное одним концом в воду, промокает все целиком кусок сахара быстро абсорбирует жидкость, даже если смочить только один его уголок; промокательная бумага втягивает чернила и т. д. и т. п. Все это — иллюстрации точно тех же явлений, что мы наблюдаем в капиллярных трубках, изображенных на рис. 97.

121. Как мелкие предметы держатся на воде. Вырежьте из т о н к о г о п л о с к о г о куска листового железа кружок диаметром в 12—15 *см*. Осторожно положите его на поверхность воды. Несмотря на то, что железо почти в 8 раз плотнее воды, кружок будет плавать на поверхности (рис. 106). Проверьте, сколько копеечных монет можно тихонько положить в центре кружка так, чтобы он еще не тонул. С помощью головной шпильки или проволочки заставьте плыть иголку (рис. 107). Если предварительно намагнитить ее, можно с помощью магнита заставить ее двигаться в разных направлениях. Чтобы уяснить себе эти, казалось бы, необычайные явления, исследуем поверхность воды в непосредственном соседстве с кружком или иголкой. Оказывается, поверхность воды опущена там, как на рис. 106 и 107. Отсюда легко найти желаемое объяснение. На иголку действует сила, направленная снизу вверх и происходящая от стремления опущенной (а поэтому вогнутой) поверхности жидкости выпрямиться в плоскую поверхность. Если вес иголки меньше этой силы — иголка не погрузится в жидкость, несмотря на свою большую плотность. Если бы вода смачивала иголку, т. е. если бы вода поднялась, а не опустилась, вокруг иголки, тогда стремление поверхности жидкости выпрямиться толкало бы иголку вниз, внутрь жидкости. Таким образом, вся-

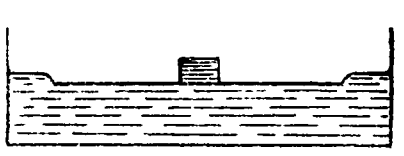


Рис. 106. Поперечное сечение плавающего железного кружка, нагруженного копеечными монетами.

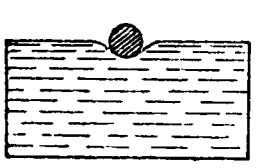


Рис. 107. Поперечное сечение плавающей иглы.

кое тело, у которого масса не слишком велика и вокруг которого жидкость опускается, — будет плавать на поверхности. Даже если жидкость стремится подняться вокруг тела, когда оно идеально чистое, достаточно едва заметного слоя жира на теле, чтобы вода вокруг него опустилась, — и тело выплывает на поверхность.

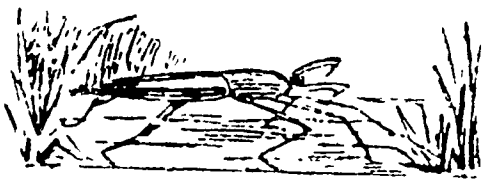


Рис. 108. Насекомое, ползающее по поверхности воды.

Предыдущие опыты объясняют всем известный факт, что некоторые насекомые ползают и бегают по воде (рис. 108), хотя по закону Архимеда они должны были бы погрузиться в воду настолько, чтобы вес вытесненной ими жидкости сделался равным их собственному весу.

Резюме. **Под влиянием сил сцепления свободная жидкость стремится принять форму, имеющую минимальную поверхность при данном объеме, — а именно форму сферы. Поэтому жидкая пленка ведет себя, как натянутая перепонка.**

Жидкость смачивает твердое тело, если в точке соприкосновения их свободных поверхностей силы сцепления между молекулами жидкости с одной стороны и между молекулами твердого тела и жидкости с другой стороны дают равнодействующую, лежащую внутри твердого тела.

Жидкость не смачивает твердого тела, если равнодействующая эта лежит внутри жидкости.

Законы, относящиеся к капиллярным трубкам, даны в § 117.

Вопросы и задачи.

1. Графит для карандашей получают из порошка графита, подвергая его огромным давлениям с помощью гидравлического пресса. Объясните, каким образом давление преобразует порошок в одну сплошную массу?
2. Объясните, почему вместо поливки цветов можно просто ставить горшок с цветами в сосуд с водой?
3. Почему остроугольный кусок стекла при нагревании докрасна на бунзеновской горелке оплавляется?
4. Дробь приготовляют так: с некоторой высоты льют расплавленный свинец через сито в воду. Почему дробь имеет сферическую форму?
5. Почему слабая струя воды разбивается на отдельные капли?
6. Почему новое и жирное стальное перо плохо пишет? Почему трудно писать на промасленной бумаге?
7. Чтобы вывести с платья стеариновые пятна, достаточно покрыть запачканное место промокательной бумагой и затем провести по ней горячим утюгом. Почему?
8. Объясните, какую роль играют капиллярные явления в оросительных системах.
9. Какая сила заставляет воду, просочившуюся в почву вследствие силы тяжести, возвратиться на поверхность земли? Влияет ли рыхлость почвы на количество воды, проступающей на поверхность и испаряющейся с нее?
10. Приведите четыре простых примера капиллярности.

АБСОРБЦИЯ ГАЗОВ ТВЕРДЫМИ И ЖИДКИМИ ТЕЛАМИ.

122. Абсорбция газов твердыми телами. Будем нагревать колбу с нашатырным спиртом. Выделившийся при этом газообразный аммиак будет вытеснять ртуть из трубки (см. рис. 109). Затем нагреем докрасна кусок древесного угля, длина которого 2,5 *см*, а ширина приблизительно равна диаметру трубки. Бросим его в ртуть. Когда кусок угля остынет, подведем его под трубку и позволим ему подняться по трубке в газ. Мы увидим, что ртуть в трубке поднимется, как на рис. 110. Почему?

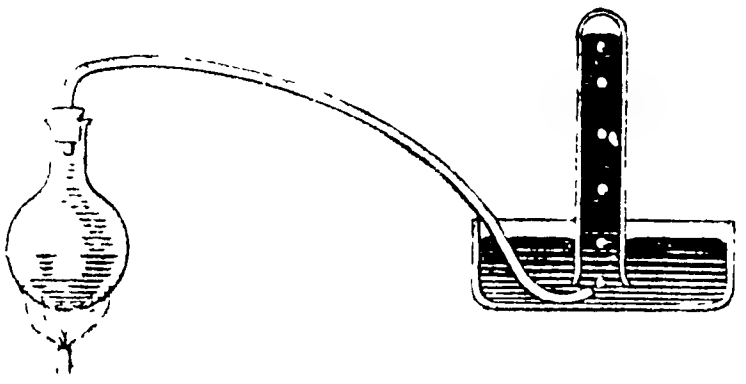


Рис. 109. Наполнение колбы аммиаком.

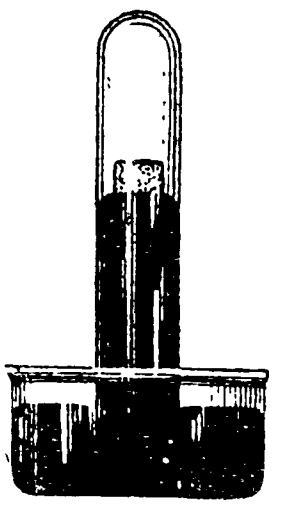


Рис. 110. Поглощение аммиака древесным углем.

Такой способностью поглощать газы обладает большое количество пористых веществ: особенно сильно она у кокосового и древесного угля. В последнее время это свойство нашло богатое промышленное применение при конденсации летучих газов, выделяющихся из нефтяных скважин, в газолин. Многие твердые тела крепко удерживают на свое поверхности тонкие слои газов, с которыми они соприкасаются. Оче-

видно, пористые тела обладают сильной абсорбирующей способностью именно в виду их большой поверхности.

Одни и те же вещества весьма различно поглощают различные газы. Так, напр., 1 объем древесного угля абсорбирует 90 объемов аммиака, 35 объемов углекислого газа и только 1,7 объема водорода. Способность древесного угля уничтожать запахи как раз основана на его огромной поглощательной способности по отношению к некоторым газам. Благодаря этой способности можно употреблять древесный уголь для противогазовых масок. Металл палладий при нагревании в водороде поглощает 800 объемов водорода.

123. Абсорбция газов жидкостями. Будем медленно нагревать сосуд с холодной водой. Множество пузырьков воздуха появится на стенках и поднимется на поверхность воды. Это, действительно, пузырьки воздуха, а не пара: во-первых, они появляются при температуре гораздо более низкой, чем температура кипения; во-вторых, поднимаясь в верхние, более холодные слои воды, они не конденсируются в жидкость. Этот опыт позволяет сделать два вывода. Первый: в воде при обыкновенных условиях содержится довольно значительное количество воздуха; второй: это количество уменьшается с повышением температуры.

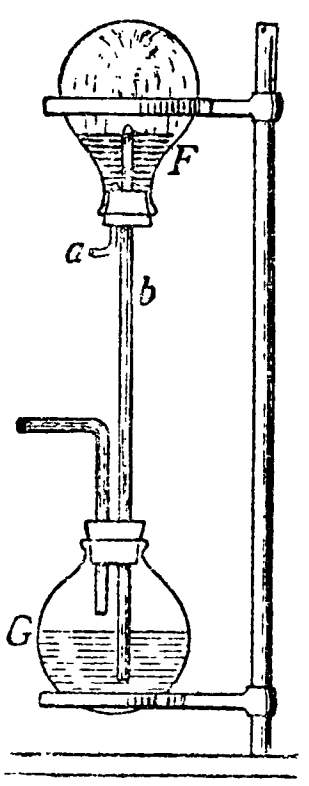


Рис. 111. Поглощение аммиака водой.

Правильность первого вывода доказывается также существованием рыб, живущих в воде: рыбы получают из растворенного в воде воздуха необходимый для жизни кислород.

Количество газа, поглощаемого водой, очень различно для разных газов. При 0°С и 76 *см* давления 1 *куб. см* воды поглощает 1 050 *куб. см* аммиака, 1,8 *куб. см* углекислого газа и только 0,04 *куб. см* кислорода. Имеющийся в продаже нашатырный спирт — просто газ аммиак, растворенный в воде.

Следующий опыт иллюстрирует поглощение аммиака водой. Наполним аммиаком колбу (рис. 111) и трубку *b*, пропуская струю его через отросток *a* и выпуская ее через *b*. Затем закупорим *a* и вставим *b* в колбу *g*, почти наполненную водой, подкрашенной лакмусом или кислотой в красный цвет. По мере поглощения аммиака вода будет медленно подниматься по трубке *b*. Достигнув *F*, вода очень быстро хлынет вверх, пока колба *F* не будет почти заполнена. При этом цвет воды от действия аммиака на лакмус из красного перейдет в синий.

Опыт показывает, что во всех случаях поглощения газов жидкостями или твердыми телами количество абсорбированного газа уменьшается с повышением температуры. Этот результат можно было предвидеть на основании кинетической теории: при увеличении молекулярной скорости, очевидно, делается труднее удержать молекулы газа.

124. Влияние давления на абсорбцию. Содовая вода — это обыкновенная вода, поглотившая большое количество углекислого газа. Чтобы получить содовую воду, обыкновенно воду под большим давлением приводят в соприкосновение с газом. Как только давление уменьшается, — газ быстро начинает выделяться из раствора. Этим

вызвано характерное шипение содовой воды. Отсюда ясно, что количество поглощаемого водой углекислого газа при больших давлениях больше, чем при низких. Тщательные опыты показали, что поглощаемое количество любого газа прямо пропорционально давлению; при давлении в 10 атмосфер вода поглощает, при соприкосновении, в 10 раз больше углекислого газа, чем при давлении в 1 атмосферу. Это — так называемый закон Генри.

Резюме. **Способность твердых и жидких тел поглощать газы уменьшается с возрастанием температуры.**

Количество газа, поглощенного жидкостью, прямо пропорционально давлению.

Вопросы и задачи.[1]

1. Почему при выделке пустотных ламп накаливания стеклянную грушу подвергают сильному нагреванию?

2. Почему на внутренней поверхности стакана с холодной водой появляются пузырьки воздуха? Как повлияло бы на количество и величину пузырьков повышение температуры окружающего воздуха?

3. Почему в маленьком аквариуме без растений рыбы не могут жить если не менять часто воду?

ГЛАВА VII.

РАБОТА И ЭНЕРГИЯ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ РАБОТЫ.

125. Определение работы. Когда сила, действуя на какое-нибудь тело, заставляет его д в и г а т ь с я, — говорят, что она совершает работу. Количество произведенной работы измеряется произведением действующей силы на длину пути, пройденного телом. Например, положим, что 1 *г* массы вертикально поднят на 1 *см*. Значит, на этот грамм массы действовала сила в 1 *г*, а пройденный путь равен 1 *см*. Поэтому, в данном случае, приложенная сила произвела 1 *г-см* работы. Если бы сила в 1 *г* подняла данное тело на 2 *см*, совершенная работа была бы равна 2 *г-см*. Если бы сила в 3 *г* подняла это же тело на 3 *см*, она произвела бы 9 *г-см* работы, и т. д.

Итак, в общем случае, если W — совершённая работа, F — величина действующей силы, а S — путь, пройденный точкой приложения силы, то о п р е д е л е н и е р а б о т ы м о ж н о в ы р а з и т ь ф о р м у л о й·

$$W = F \times S \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

В научном смысле слова работа произведена над телом только тогда, если сила, действующая на тело, сообщила ему н е к о т о р о е д в и ж е н и е.

Колонны, поддерживающие здание, не производят работы. Человек, силящийся сдвинуть камень, не совершает работы, если ему не удается сдвинуть камень с места. В просторечии мы часто говорим, что совершаем работу, когда мы просто держим в руках тяжести

---

[1] Дополнительные вопросы и задачи к главе VI приведены в приложении.

или вообще делаем что-нибудь утомительное и устаем. Но в физике, как показывает формула (1), слово «работа» обозначает не приложенное усилие, а достигнутый результат.

126. Единицы работы. В метрической системе приняты две единицы работы: грамм-сантиметр и килограмм-метр. Грамм-сантиметр — это работа, совершенная силой в 1 *г*, если путь, пройденный ее точкой приложения, равен 1 *см*. Килограмм-метр — работа, совершенная силой в 1 *кг*, если путь, пройденный ее точкой приложения, равен 1 *м*. Иногда употребляют еще грамм-метр.

В абсолютной системе единиц дина есть единица силы, а дин — *см*, или эрг, — соответствующая единица работы. Эрг — это работа, совершенная силой в 1 дину, если ее точка приложения прошла путь в 1 *см*. Для подъема 1 *л* воды на высоту 1 *м* нужно совершить работу в 1 000 × 980 × 100 = = 98 000 000 эргов. Очевидно, эрг — чрезвычайно маленькая единица. Поэтому, обыкновенно, употребляют единицу работы равную 10 000 000 эргам. Эту единицу назвали джоулем, в честь великого английского физика Джемса Прескоттс Джоуля (1818—1889). Работа, совершённая при подъеме 1 *л* воды на высоту в 1 *м*, равна 9,8 джоулям.

Резюме. **Работа = сила × путь; т. е. $W = F \times S$; единицы работы: грамм-сантиметр *(г-см)*, грамм-метр *(г-м)*, килограмм-метр *(кг-м)*. Абсолютные единицы работы: дин-сантиметр, или эрг, и джоуль (= 10 000 000 эргов)**

Вопросы и задачи.

1. Плотник, нажимая пилу с силой в 3 *кг*, спилил кусок в 1 *м* длиной. Какую он совершил работу?
2. Женщина чистила ковер. Для этого она двигала трубку пылесоса на протяжении 40 *м*, прилагая в среднем силу в 200 *г*. Какую она совершила работу?
3. Чтобы протащить по полу сундук, весящий 60 *кг*, нужна сила в 20 *кг*. Какую надо совершить работу, чтобы протащить его 25 *м*? Чтобы поднять его вертикально на 5 *м*?
4. Лошадь поднимает метрическую тонну угля на гору высотой в 30 *м*. Выразите в *кг-м* совершенную ею работу. (Метрич. тонна = 1 000 *кг*.)
5. Некая мощная машина развивала среднюю силу в 36 *т*, пробуравливая отверстия в стальном листе толщиной в 2,5 *см*. Выразите совершённую работу в *кг-м*.
6. Почему совершают меньше работы, когда растягивают с силой в 1 000 *кг* стальной стержень, чем когда с такой же силой растягивают свернутую пружину?

Можно ли этим самым рассуждением доказать, что котлы лучше испытывать не сжатым воздухом, а водой? Объясните, почему.

РАБОТА, ПРИЛОЖЕННАЯ К СИСТЕМЕ БЛОКОВ И СОВЕРШЕННАЯ ЕЮ.

127. Один неподвижный блок. Будем тянуть за пружинные весы S (рис. 112), пока груз не начнет медленно подниматься. Если вес груза R равен 100 *г*, и если в блоке нет трения, стрелка пружинных весов тоже укажет 100 *г*.

Этот опыт показывает, что при одном неподвижном блоке действующая сила, или усилие E, производящее движение, равна сопротивлению, т. е. силе R, сопротивляющейся движению.

Длина веревки остается постоянной. Поэтому путь, пройденный A — точкой приложения силы E, — всегда равен высоте S подъема

груза R. Итак, работа, приложенная к данной системе в точке A, равна $E \times S$, а работа, совершенная этой системой, равна $R \times S^1$. Очевидно, в виду равенств $S = S^1$ и $R = E$, получаем:

$$E \times S = R \times S^1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

т. е., при одном неподвижном блоке работа, совершенная действующей силой E (усилием), равна работе, совершенной против сопротивления. Иначе: работа, приложенная к машине в точке A, равна работе, совершенной машиной в точке R.

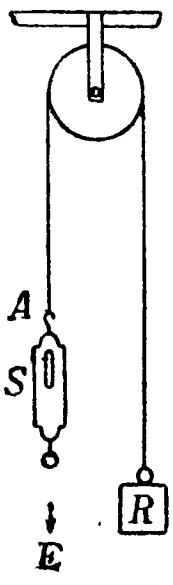


Рис. 112. Неподвижный блок.

128. Один подвижной блок. Будем теперь преодолевать тяжесть массы R с помощью одного подвижного блока, как показано на рис. 113. В этом случае вес R (где R — общий вес и блока и подвешенного груза) распределен между обоими концами веревки: B и C. Значит, чтобы при отсутствии трения удержать груз R в равновесии или медленно поднимать его кверху, к точке A надо приложить силу E, равную только половине R. Показание весов с соответствующей поправкой на вес самих весов доказывает, что это действительно так.

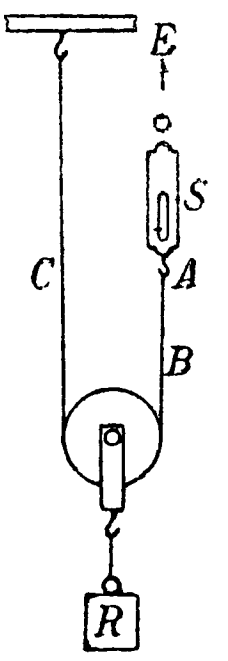


Рис. 113. Подвижной блок.

Итак, опыт показывает, что в случае одного подвижного блока усилие E равно как раз половине сопротивления R. Посмотрим, однако, какую работу произведет сила E при подъеме груза R на высоту S^1. Оказывается, точка A должна подняться на 2 *см* для того, чтобы груз R поднялся на 1 *см*, ибо каждый из концов B и C должен укоротиться на 1 *см*. Поэтому и тут, так же как и для неподвижного блока, имеем, помня, что $R = 2E$ и $S^1 = \frac{1}{2}S$:

$$E \times S = R \times S^1.$$

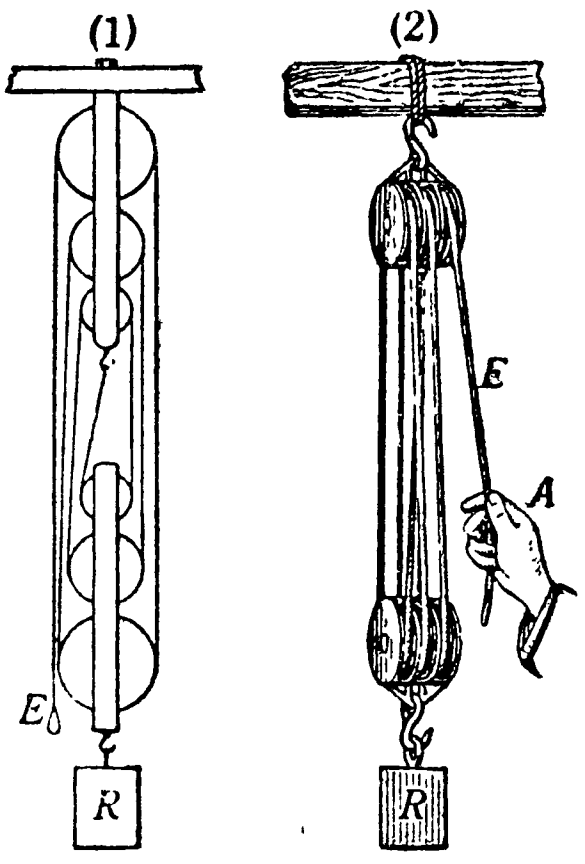


Рис. 114. Комбинация блоков (полиспаст).

Т. е. и в случае одного подвижного блока работа, приложенная к машине усилием E, равна работе, произведенной машиной против сопротивления R.

129. Комбинация нескольких блоков (полиспаст). Поднимем R с помощью системы блоков [рис. 114, (1) и (2)]. Так как здесь R поддерживается шестью концами веревки, то ясно, что сила, необходимая для удержания R в равновесии или для медленного подъема R, равна, при отсутствии трения, только $^1/_6 R$.

Опыт подтверждает правильность такого вывода. Надо только исключить влияние трения, подчас довольно значительное. Для этого берут среднее из 2 сил: одной, которую необходимо приложить

к точке E, чтобы она начала медленно подниматься, и другой такой, чтобы под ее влиянием E стала медленно опускаться. Итак, относительно любой комбинации подвижных блоков можно высказать такое утверждение: если n есть число концов веревки, между которыми распределен вес груза, то

$$\frac{R}{E} = n \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Попробуем рассчитать, какую работу производит сила E при подъеме веса R на высоту S^1. Для подъема R на 1 *см* каждый конец веревки надо укоротить на 1 *см*, т. е. точка A должна пройти путь, равный n *см*. Значит, $S^1 = \frac{S}{n}$. Отсюда, пренебрегая трением, имеем и в этом общем случае:

$$E \times S = R \times S^1,$$

т. е. несмотря на то, что усилие E равно всего $\frac{1}{n}$ сопротивления R, все же работа, приложенная к машине усилием E, равна работе, произведенной машиной против сопротивления R.

130. Выигрыш в силе. Предыдущие опыты показывают, что иногда можно, прилагая малую силу E, преодолеть гораздо бо́льшую силу сопротивления R. Отношение сопротивления R к усилию E (пренебрегая трением) называется выигрышем в силе. Так, напр., выигрыш в силе от одного неподвижного блока равен одному, от одного подвижного блока — двум, от системы подвижных блоков, показанной на рис. 114, — шести, и т. д.

Если действующая сила приложена не к E, а к R, выигрыш в силе от системы блоков рис. 114 равен $^1/_6$, ибо к R надо приложить 6 *кг*, чтобы поднять 1 *кг*, приложенный к E. Однако в этом случае точка приложения сопротивления E движется в шесть раз быстрее и делает в шесть раз больший путь, чем точка приложения R действующей силы. Итак, мы видим: можно пожертвовать скоростью и выиграть силу, или пожертвовать силой и выиграть скорость. Но всегда выигрыш в одном равен потере в другом. Например, в гидравлическом элеваторе, показанном на рис. 16 (стр. 21), клетка движется с той же скоростью, что и поршень; а в элеваторе на рис. 17 она движется в 4 раза скорее. Значит, в этом втором элеваторе для подъема одинакового груза приходится прилагать к поршню силу, в четыре раза бо́льшую, чем в первом элеваторе. Т. е., диаметр цилиндра второго элеватора должен быть в два раза больше.

Резюме. **В идеальной системе блоков без трения работа, затраченная усилием E, равна работе, произведенной системой против сопротивления R.**

Выигрыш в силе всякой машины равен, если пренебречь трением, отношению сопротивления R к усилию E.

Когда R больше E, теряется скорость и выигрывается сила. Когда R меньше

***E*, теряется сила и выигрывается скорость. Коэффициент полезного действия системы блоков с одной веревкой равен числу концов веревки, между которыми распределен вес.**

$$\frac{R}{E} = n.$$

Обычно, *n* на единицу меньше общего числа всех концов веревки.

Вопросы и задачи.

1. Два человека, прилагая силу по 25 *кг* каждый, подняли с помощью системы блоков 150 *кг*. Полагая что трения нет, вычислите, сколько метров веревки стянули они вниз, поднимая 150 *кг* на 6 *м*?

2. Неподвижные блоки очень часто употребляются при вешании флагов, натягивании веревок для сушки белья и т. д. Объясните, почему?

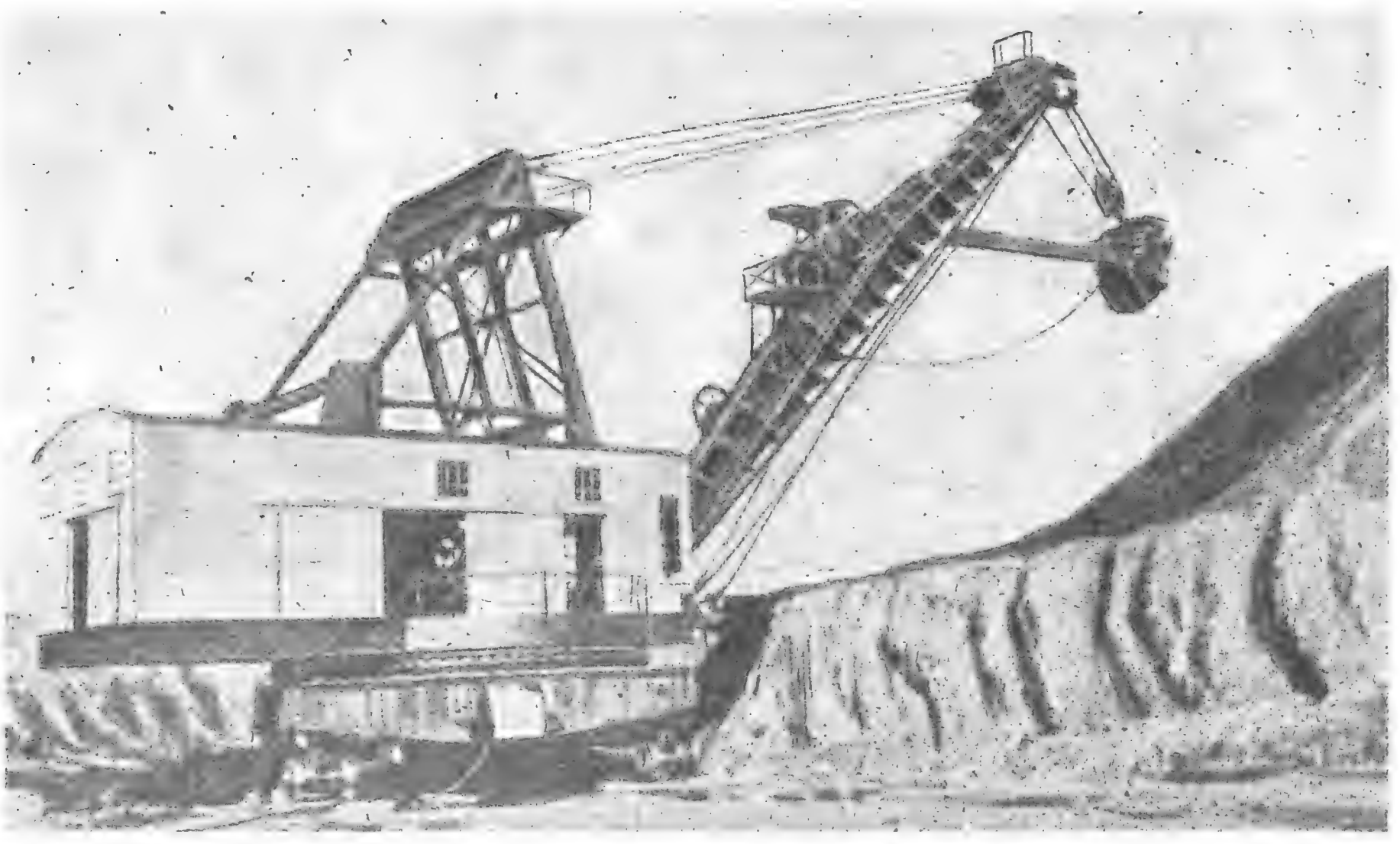
3. 1) Начертите систему блоков, состоящую из двойного неподвижного и одиночного подвижного блока. 2) Какой груз может уровновесить сила в 15 *кг*, будучи приложена к свободному концу веревки?

4. Рояль был поднят с помощью двойного подвижного и тройного неподвижного блока. 1) Начертите эту систему блоков. 2). Какой выигрыш в силе этой системы?

РАБОТА И РЫЧАГ.

131. Закон рычагов. Рычаг — это твердый стержень, могущий свободно вращаться вокруг некоторой точки *P*. Точку *P* называют точкой опоры (рис. 115).

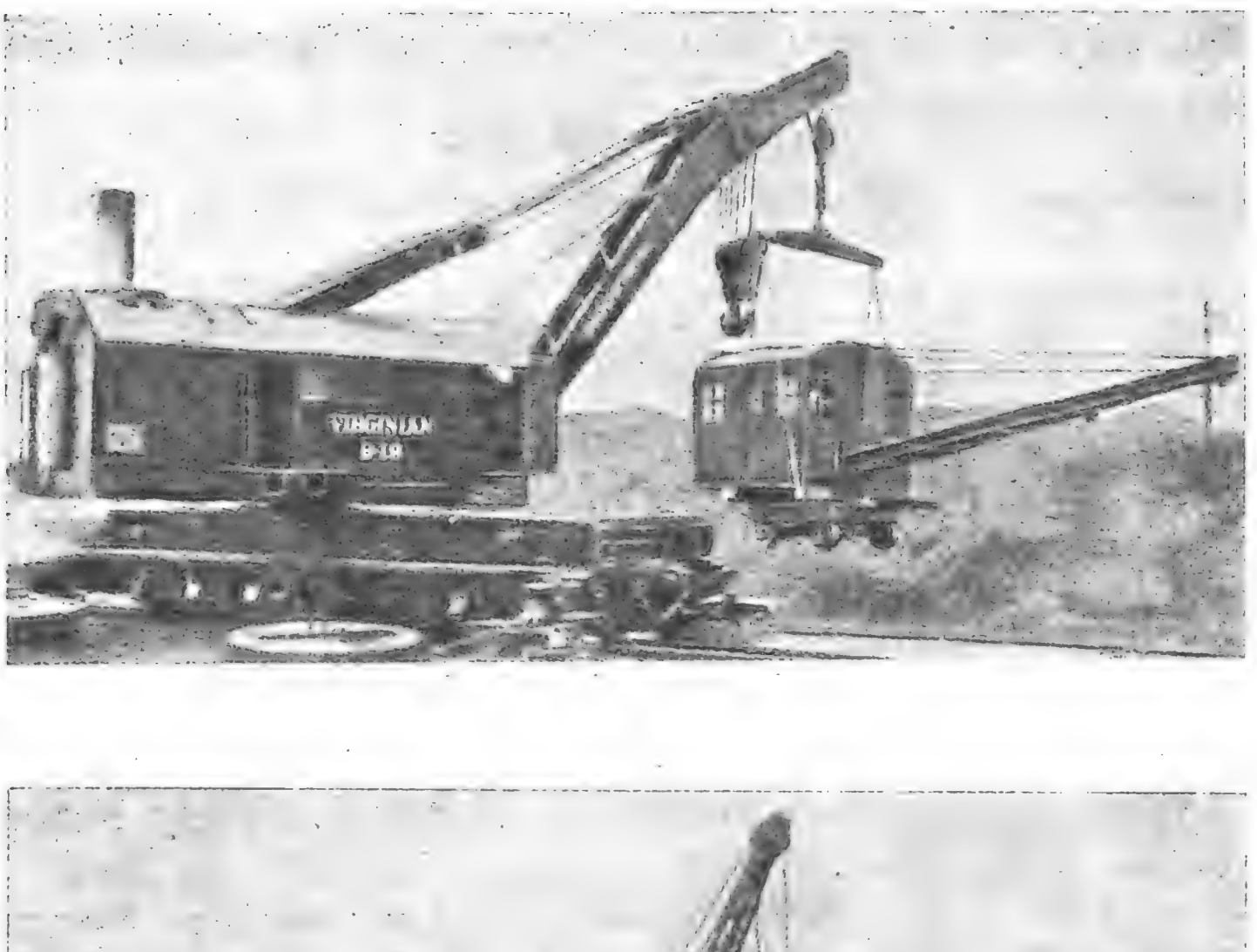
Сбалансируем однометровый стержень, как показано на рисунке 115. Затем, в точке, отстоящейна 15 *см* от точки опоры, подвесим на шнурке массу,



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭКСКАВАТОР.

Гигантский электрический экскаватор — машина очень похожая на живое существо. Она употребляется для разного рода экскавационных работ и является попросту комбинацией рычагов и блоков. Черпалка имеет емкость в 8 *куб м* (10 тонн угля).

хотя бы в 300 *г*. Потом найдем по другую сторону точки опоры точку, в которой надо подвесить массу в 100 *г*, чтобы она уравновесила массу в 300 *г*. Эта точка окажется на расстоянии 45 *см* от точки опоры. Легко видеть, что произведение 300 × 15 равно произведению 100 × 45.



ПОДЪЕМНЫЕ КРАНЫ.

Подъемные краны — являются только комбинацией рычагов и блоков. На верхнем рисунке — самый большой в мире кран, служащий для очистки путей после крушений, им может управлять один человек. Он может поднять свыше 200 тонн и заменяет 50 человек рабочих. Здесь показано, как этот кран поднимает другой такой же кран.

Затем найдем точку, в которой 150 *г* уравновешивают 300 *г*. Она окажется на расстоянии 30 *см* от точки опоры. Опять имеем равенство 300 × 15 = = 150 × 30.

Где бы мы ни помещали грузы, и какие бы грузы мы ни помещали с той и с другой стороны точки опоры, всегда, если рычаг в равновесии, произведение силы E на расстояние ее точки приложения

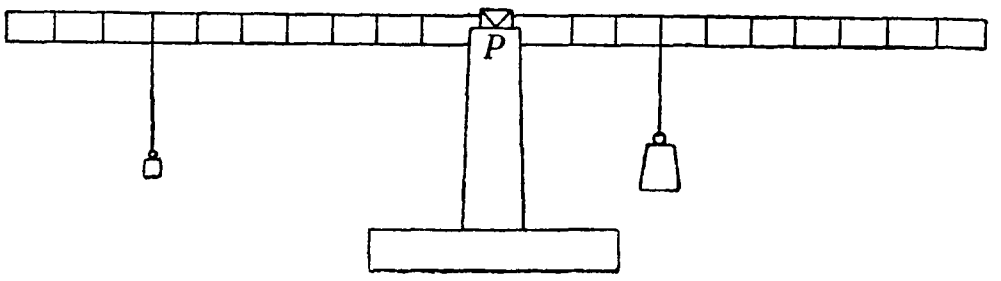


Рис. 115. Рычаг.

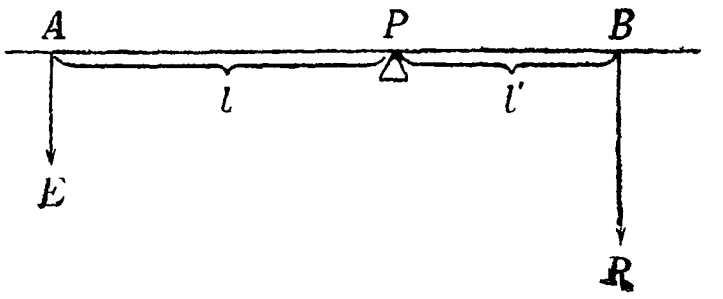


Рис. 116. Иллюстрация закона моментов: El = Rl'.

от точки опоры (рис. 116) равно произведению сопротивления R на его расстояние l' от точки опоры. Расстояния l и l' (отсчитываемые по перпендикуляру к направлению сил) называются плечами р ы ч а г а, соответствующими силам E и R. Произведение силы на соответствующее ей плечо рычага называется м о м е н т о м этой силы (рис. 117). Таким образом, результаты всех наших опытов с рычагами можно выразить так: м о м е н т у с и л и я р а в е н м о м е н т у с о п р о т и в л е н и я.

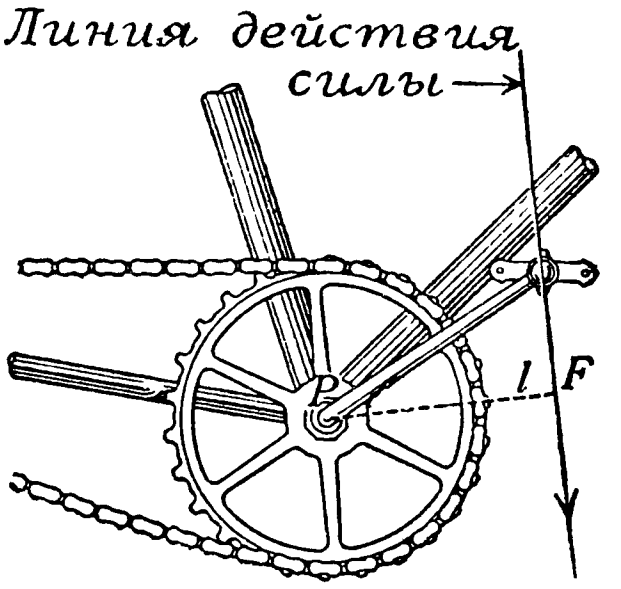


Рис. 117. Момент силы ноги седока равен произведению силы на плечо, $F \times l$.

Или в алгебраической форме:

$$El = Rl' \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Очевидно, выигрыш в силе от рычага, т. е. $\frac{R}{E}$, равен $\frac{l}{l'}$, т. е. о т н о ш е н и ю п л е ч а р ы ч а г а, с о о т в е т с т в у ю щ е м у с и л е, к п л е ч у р ы ч а г а, с о о т в е т с т в у ю щ е м у с о п р о т и в л е н и ю.

132. Законы рычагов в общем случае. Положим, что в нескольких точках рычага приложены параллельные силы; в частных случаях, изображенных на рис. 118 и 119, окажется, что рычаг будет в равновессии при

$$200 \times 30 = 100 \times 20 + 100 \times 40$$

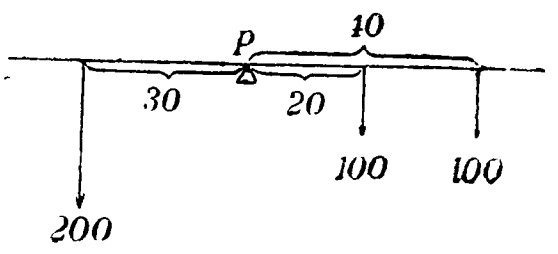


Рис. 118.

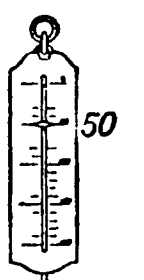
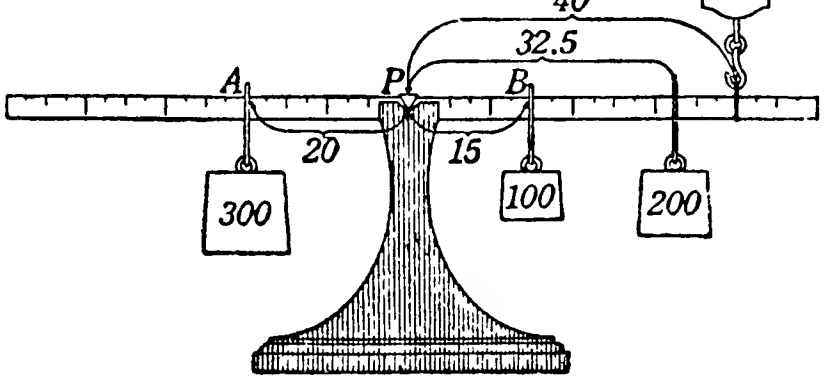



Рис. 119.

Условие равновесия стержня, находящегося под действием нескольких сил.

и

$$300 \times 20 + 50 \times 40 = 100 \times 15 + 200 \times 32{,}5,$$

т. е, когда с у м м а м о м е н т а в с е х с и л, с т р е м я-

щихся повернуть рычаг вокруг некоторой оси в одном направлении, равна сумме моментов всех сил, стремящихся повернуть рычаг в противоположном направлении.

«РАКЕТА» И «ВИРДЖИНИЕН МАЛЛЕТ».

Здесь показаны сравнительные размеры Стефенсоновского паровоза «Ракета», курсировавшего в октябре 1829 г. между Манчестером и Ливерпулем, и самого большого из построенных до сих пор паровозов «Виржиниен Маллет» изготовленного в мастерских Американской паровозостроительной компании в Нью-Йорке. «Ракета» весила $4\frac{1}{4}$ тонн и заслужила премию в 500 долларов за провоз вагона с 30 пассажирами со скоростью от 26—30 миль в час. «Виржиниен Маллет» весит 450 тонн и обладает движущей силой в 88 300 *кг*. Мощность его приблизительно равна 51 000 л. с.

Подвесим затем те же рычаги (рис. 118 и 119) за точку P на пружинных весах. При соответствующей поправке на вес самого стержня, окажется, что в обоих случаях весы покажут соответственно $200+100+100=400$ и $300+100+200-50=550$. Т. е. сумма всех сил, действующих на рычаг в одном на-

правлении, равна сумме сил, действующих на рычаг в противоположном направлении.

133. Пара сил. Есть один случай, когда невозможно заменить параллельные силы одной равнодействующей. Такой случай изображен на рис. 120. Такие две параллельные силы, равные по величине и противоположные по направлению, приложенные к рычагу в двух различных точках, называются парой сил. Уравновесить эти силы можно только другой парой, стремящейся повернуть рычаг в противоположном направлении. Момент пары сил, очевидно, равен: $F_1 \times oa + F_2 \times ob = F_1 \times ab$, т. е. он равен произведению одной из сил на расстояние между силами.

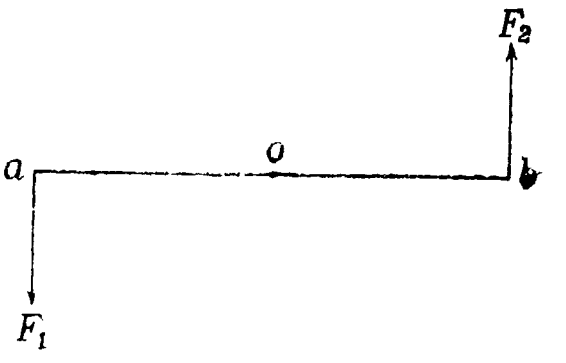


Рис. 120. Пара сил.

134. Работа, приложенная к рычагу и совершенная им. Как мы только что видели, при равновесии рычага (когда рычаг находится в покое или движется равномерно) соотношение между силой E и сопротивлением R дается законом моментов:

$$El = Rl'.$$

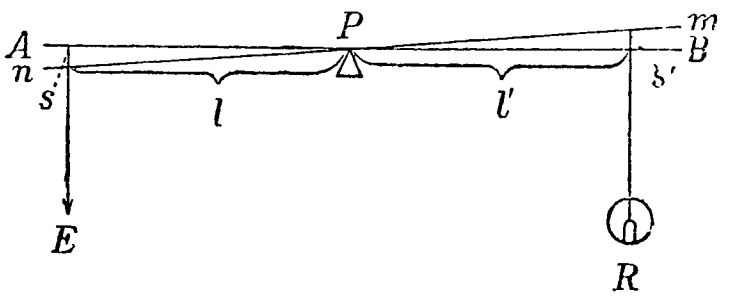


Рис. 121. Закон моментов: $El = Rl'$ равносилен уравнению $ES = RS'$.

Положим теперь, что сила E поднимает груз R на небольшую высоту S'. (Такой случай мы рассматривали, когда изучали работу блоков.) Для этого точка A приложения силы E должна пройти путь S (рис. 121). Из подобия треугольников AP и BP ясно, что $\frac{l}{l'} = \frac{S}{S'}$. Так как уравнение (4), выражающее закон рычагов, можно представить в виде: $\frac{E}{R} = \frac{l'}{l}$ то можно представить его и в таком виде:

$$\frac{E}{R} = \frac{S'}{S} \quad \text{или} \quad ES = RS'.$$

ES — это работа, произведенная силой E, а RS' — работа сопротивления R. Значит, закон моментов, который, как показал опыт, является и законом рычагов, эквивалентен утверждению: работа, приложенная к рычагу усилием E, всегда равна работе, произведенной рычагом против сопротивления.

135. Три рода рычагов. Только что высказанный закон (§ 134) приложим ко всем видам рычагов. Однако все же принято подразделять рычаги на три рода:

1. Рычаги первого рода: точка опоры P находится между точками приложения действующей силы E и силы сопротивления R (рис. 122). Выигрыш в силе рычагов первого рода больше или меньше единицы, в зависимости от того, будет ли плечо рычага l, соответствующее усилию, больше или меньше плеча l', соответствующего сопротивлению.

2. Рычаги второго рода: точка приложения сопротивления R находится между точкой приложения усилия E и точкой опоры P (рис. 123). В таких рычагах плечо, соответствующее усилию, т. е. расстояние от E до P, очевидно, больше плеча, соответствующего сопротивлению, т. е. расстояния от R до P. Поэтому выигрыш в силе рычагов второго рода всегда больше единицы.

3. Рычаги третьего рода: точка приложения действующей силы находится между точкой приложения сопротивления и точкой опоры (рис. 124). Очевидно, здесь выигрыш в силе меньше единицы. Т. е. в таких рычагах всегда жертвуют силой, чтобы выиграть скорость.

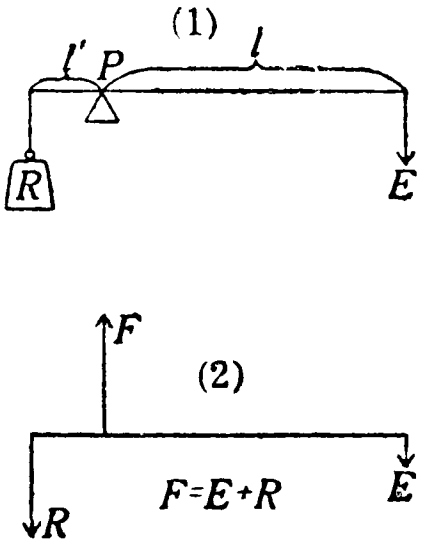


Рис. 122. Рычаги первого рода.

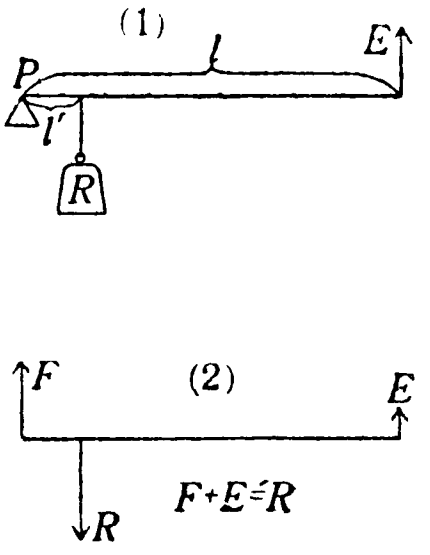


Рис. 123. Рычаги второго рода.

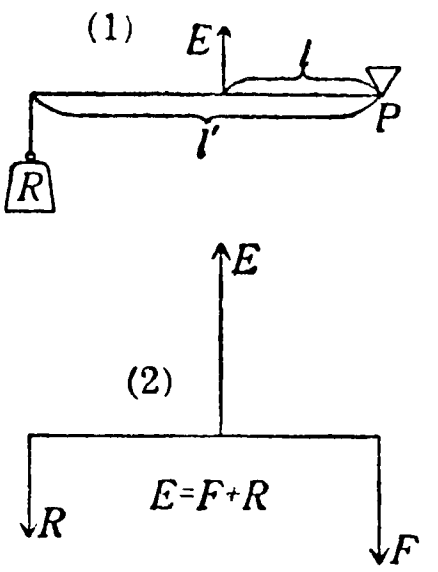


Рис. 124. Рычаги третьего рода.

Во всех трех случаях сила, приложенная к рычагу в точке опоры P, может быть найдена из соотношения, выведенного в конце § 132.

Резюме. **Момент силы равен произведению силы на соответствующее ей плечо рычага.**

Плечом рычага называется расстояние от оси вращения до точки приложения действующей силы, отсчитываемое по перпендикуляру к направлению силы.

Закон простого рычага. Момент усилия равен моменту сопротивления, т. е. $Ee = Rl'$.

Общий закон рычагов. (1) Сумма всех моментов, стремящихся повернуть рычаг в одном направлении около некоторой оси, равна сумме всех моментов, стремящихся повернуть рычаг в противоположном направлении.

(2) Сумма всех сил, действующих на рычаг в одном направлении, равна сумме всех сил, действующих на него в противоположном направлении.

В идеальном рычаге работа, приложенная к рычагу усилием, равна работе, произведенной рычагом против сопротивления. Пара сил состоит из пары одинаковых по величине и противоположных по направлению сил, приложенных к двум различным точкам рычага. Пару сил можно уравновесить только противоположно-направленной парой, имеющей одинаковый с первой момент.

Вопросы и задачи.

1. На каком принципе основано взвешивание с помощью безмена (рис. 125). Каков должен быть вес P, если, будучи на расстоянии 40 *см* от точки опоры O, он уравновешивает груз в 10 *кг*, отстоящий от O на 2 *см*?

2. Почему жестяник употребляет ножницы с длинным ручками и короткими лезвиями, а портной, наоборот, ножницы с короткими ручками и длинными лезвиями?

3. В лавке весы неравноплечие: длина левого плеча равна 99% длины правого. Продавец имеет привычку при взвешивании класть товар на левую чашку весов? Кто при этом выигрывает, торговец или покупатель? Почему?

4. Положим, что вы знаете ваш собственный вес. Можете ли вы определить вес вашего товарища только с помощью линейки и доски, уравновешенной на бревне?

5. Два мальчика на длинной палке несут мешок с орехами. Мешок висит как раз на середине палки. Мальчики могут держать палку как ближе, так и дальше от мешка. Составит ли это какую-нибудь разницу, если все время оба мальчика находятся на одинаковых расстояниях от мешка?

6. Два мальчика на шесте несут груз, весящий 30 *кг*. Сколько *кг* тащит каждый мальчик, если груз находится на расстоянии 1 *м* от одного мальчика и $1\,/_2$ *м* от другого. (Силу, прилагаемую одним из мальчиков, примите за усилие, груз — за сопротивление, а плечо второго мальчика — за точку опоры.)

7. Двое мужчин поднимают небольшой 10- метровый телеграфный столб, весящий 200 *кг*. Центр тяжести столба находится на расстоянии 5 *м* одного его конца. Сколько *кг* поддерживает каждый мужчина, если они держат столб за самые к[illegible]ая?

8. Надо приподнять один конец рояля, чтобы удалить сломанное медное колесико под одной из ножек рояля. Для этого необходимо затратить силу в 120 *кг*. Сделайте чертеж, показывающий, как можно с помощью двухметрового стального стержня в качестве рычага второго рода поднять рояль, прилагая силу в 20 *кг*.

9. Сделайте несколько чертежей (см. рис. 177), поясняющих, как момент силы ноги велосипедиста при каждом полуобороте возрастает от нуля до некоторого максимума и затем опять убывает до нуля.

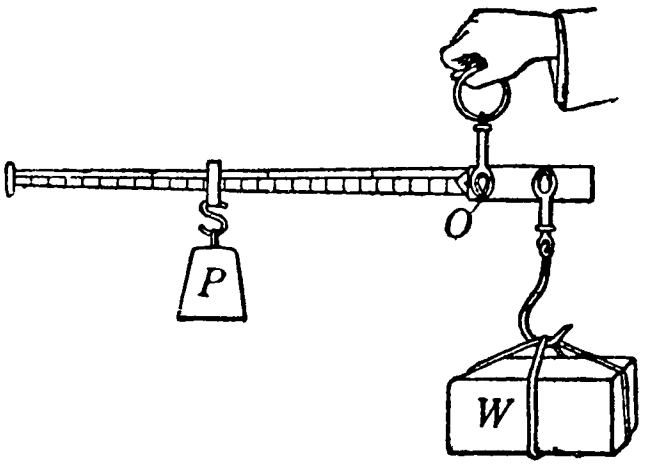


Рис. 125. Безмен.

10. Рычаг имеет 1,5 *м* в длину. Где надо поместить точку опоры, чтобы вес в 150 *кг* на одном конце рычага уравновесил вес в 25 *кг* на другом конце?

11. Телефонный столб длиной в 12 *м* можно уравновесить в горизонтальном положении на подставке, отстоящей на 3 *м* от толстого конца. Если же подставка находится в 5 *м* от толстого конца, столб будет в равновесии только тогда, если на тонкий конец сядет рабочий, весящий 80 *кг*. Найдите вес столба.

12. Человек положил себе через плечо палку в 1 *м* длиной, причем сзади плеча стержень торчит на 30 *см*. На этом конце висит узел, весящий 5 *кг*. С какой силой человек должен тянуть вниз за передний конец палки, чтобы уравновесить узел? Найдите силу, с которой плечо давит вверх на палку (весом самой палки можно пренебречь). Какова была бы эта сила, если бы позади плеча палка торчала на 70 *см*?

13. Почему пару сил нельзя уравновесить одной силой?

ЗАКОН РАБОТ.

136. Вывод закона работ. Изучая блоки, мы пришли к заключению, что в этих машинах всегда работа приложенного усилия равна работе, произведенной против сопротивления. При этом предполагается, что всегда можно пренебречь трением и что все движения — равномерные, так что ни малейшей части силы не тратится на преодоление инерции. Изучение рычагов привело нас к точно таким же выводам. В главе II, разбирая гидравлический пресс, мы наткнулись на этот же закон: произведение силы, действующей на малый пор-

шень, на пройденный этим поршнем путь было равно произведению силы, действующей на большой поршень, на пройденный им путь.

Аналогичные опыты с самыми различными машинами показали, что всегда имеет место следующий общий закон:

Во всех машинах, какого бы то ни было устройства, в тех случаях, когда можно пренебречь трением или исключить его, работа, приложенная к машине, равна работе, произведенной машиной.

Это важное обобщение называется законом работ и было впервые высказано Ньютоном в 1687 г. Этот закон оказался одним из самых плодотворных принципов в физике. Применяя его, легко для любого сорта машин найти соотношение между приложенной и преодоленной силой, если только можно пренебречь трением, и движения происходят достаточно медленно. Для этого надо произвести или вообразить себе некоторое перемещение на одном конце машины, и затем измерить или вычислить соответствующее перемещение на другом ее конце. Отношение второго перемещения к первому и есть отношение действующей силы к преодоленной силе.

137. Ворот. Применим принцип работ к выводу закона ворота (рис. 126 и 127). При одном обороте большого колеса точка A веревки опустится на расстояние, равное окружности колеса. За это время груз R будет поднят на высоту, равную окружности вала. Таким образом, уравнение $ES = RS^1$ для этого случай имеет вид:

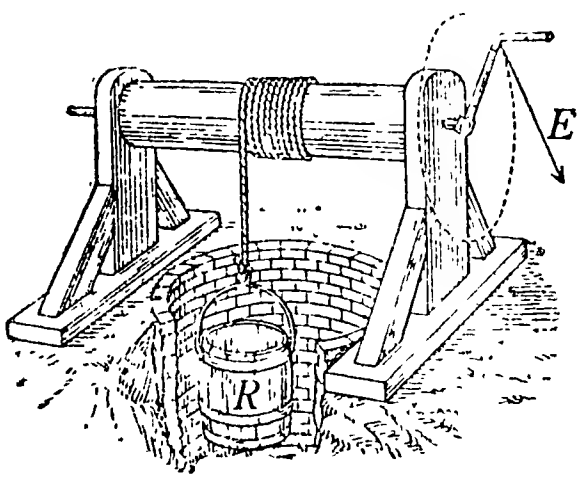


Рис. 126. Колодезный ворот, комбинация колеса с валом.

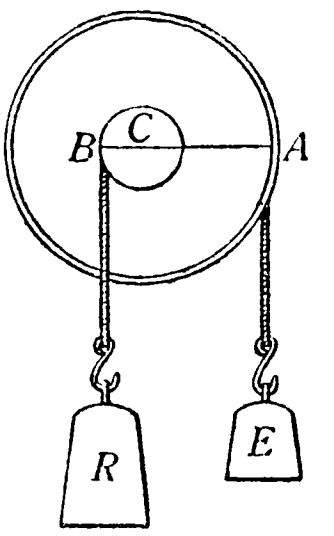


Рис. 127. Колесо и вал.

$$E \times 2nR\omega = R \times 2nra,$$

где $R\omega$ и ra—радиусы колеса и вала. Это уравнение можно переписать так:

$$\frac{R}{E} = \frac{R\omega}{ra}, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

т. е. груз, поднятый валом, так относится к силе, приложенной к колесу, как радиус колеса к радиусу вала.

Другими словами выигрыш в силе для ворота равен радиусу, диаметру или окружности колеса, деленному соответственно на радиус, диаметр или окружность вала.

138. Применение принципа работ к наклонной плоскости. Работа, произведенная против силы тяжести, при подъеме груза R (рис. 128) до высоты наклонной плоскости, очевидно, равна произведению R на высоту плоскости h. С другой стороны, работа, произведенная действующей силой E при втаскивании груза P по наклон-

ной плоскости до верха, равна произведению E на длину плоскости l. Отсюда, согласно принципу работ, имеем:

$$El = Rh \quad \text{или} \quad \frac{R}{E} = \frac{l}{h} \ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

Это значит, что выигрыш в силе наклонной плоскости, т. е. отношение веса поднятого груза к силе, действующей параллельно плоскости, равен отношению длины плоскости к ее высоте.

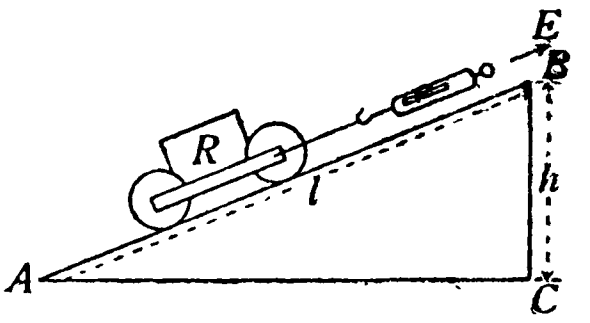


Рис. 128. Наклонная плоскость.

К этому же выводу мы пришли иным путем в главе V, стр. 58.

139. Винт. Винт (рис. 129) является комбинацией наклонной плоскости и рычага. Закон винта легко получить из принципа работ. В то время как точка под влиянием силы, действующей на один конец рычага, сделает полный оборот, груз, покоящийся на винте, очевидно, поднялся на высоту, равную расстоянию между двумя последовательными витками винта. Это расстояние d называется ходом винта. Значит, если длину рычага обозначим через l, получаем из принципа работ:

$$E \times 2nl = Rd$$

или

$$\frac{R}{E} = \frac{2nl}{d}, \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7)$$

т. е. для винта выигрыш в силе, равный отношению поднятого груза к приложенной силе, равен отношению длины окружности круга, пройденного концом рычага, к расстоянию между витками винта.

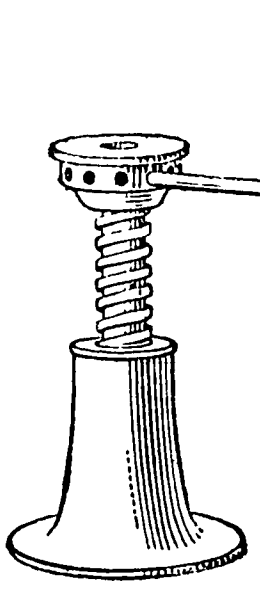


Рис. 129. Подъемный винт.

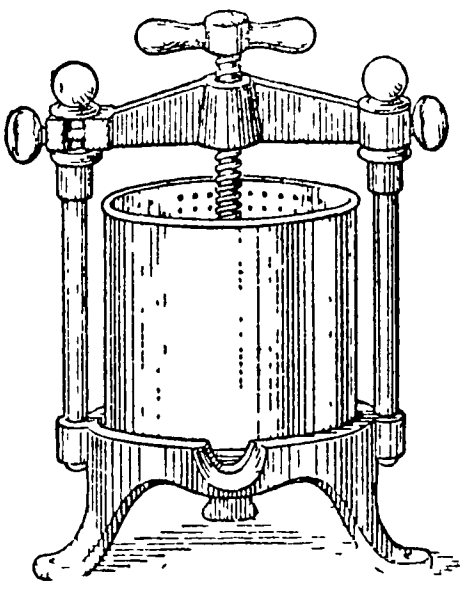


Рис. 130. Пресс.

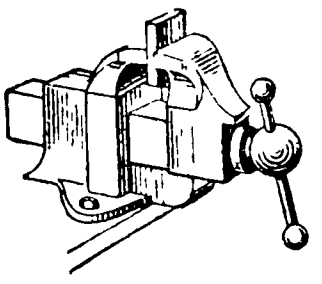


Рис. 131. Тиски.

На практике в таких механизмах трение всегда очень велико. Поэтому приложенная сила всегда должна быть гораздо больше силы, вычисленной по формуле (7). Обыкновенный, только что описанный винт домкрата (употребляемый главным образом для подъема зданий, винтовой тальрек, автомобильный домкрат, микрометрический винт для измерения очень малых расстояний и, наконец, тиски—все это различные виды винта.

140. Зубчатые колеса. Один из видов машин с очень большим выигрышем в силе — это система зубчатых колес (рис. 132). Пусть учащийся,

пользуясь принципом работ: $ES = RS^1$, покажет, что $\frac{R}{E}$ такого механизма есть:

$$\frac{\text{длина окружности } a}{\text{длина окружности } e} \times \frac{\text{число зубцов } d}{\text{число зубцов } c} \times \frac{\text{число зубцов } f}{\text{число зубцов } b} \quad . \quad . \quad (8)$$

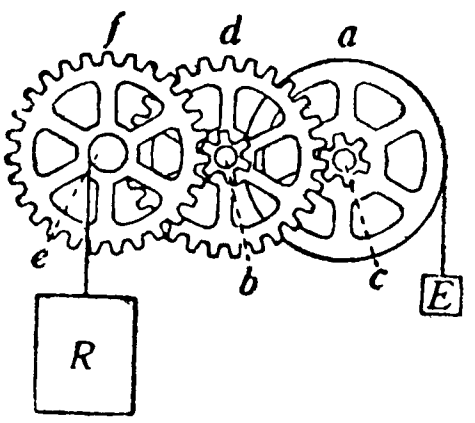


Рис. 132. Зубчатые колеса.

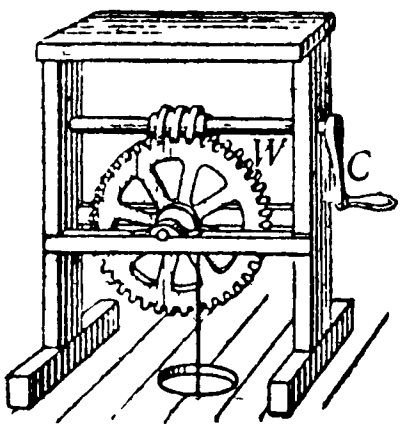


Рис. 133. Червячное колесо.

141. Червячное колесо. Еще один механизм с большим выигрышем в силе это — червячное колесо (рис. 133). Пусть l — это длина рукоятки c, n — число зубцов в зубчатом колесе w, z — радиус вала; докажите, что выигрыш в силе дается формулой:

$$\frac{R}{E} = \frac{2\,nln}{2\,nz} = n\,\frac{l}{r} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

Этот механизм особенно полезен, когда выгоднее потерять скорость, чем увеличить прилагаемую силу. Очевидно, в то время как зубчатое колесо делает один оборот, рукоятке приходится сделать n оборотов. Обычно «червячная» передача устраивается на задних валах автомобилей.

142. Дифференциальный блок. В дифференциальном блоке (рис. 134) бесконечная цепь перекинута через неподвижный блок A; оттуда она спускается на подвижный блок C, потом опять поднимается и проходит через неподвижный блок B, наглухо прикрепленный к A, но несколько отличающийся от A диаметром. Цепь не может скользить по блокам, так как задерживается на них зубцами. Если в точке E [как на рис. 134 (2)] потянуть цепь вниз так, чтобы верхние неподвижные блоки сделали полный оборот, кусок цепи между верхними блоками и нижним укоротится на длину, равную разности между окружностями блоков A и B: на блок намотается длина цепи, равная окружности большего блока, и смотается длина цепи, равная окружности меньшего блока. Значит, груз R окажется поднятым на высоту, равную половине разности длин окружностей A и B. Следовательно, выигрыш в силе равен длине окружности A, деленной на половину разности между длинами окружностей A и B.

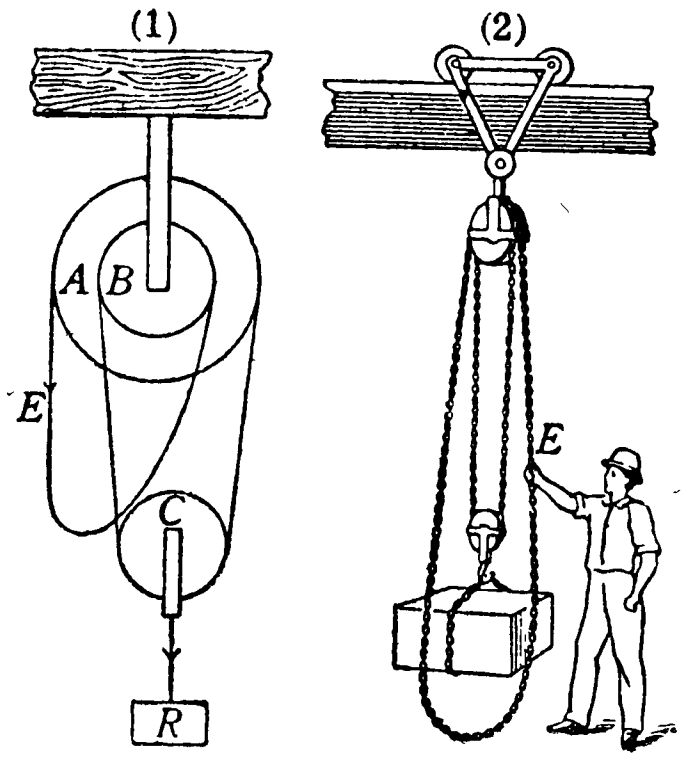


Рис. 134. Дифференциальный блок.

Резюме. **Ньютоновский принцип работ. Во всех машинах, независимо от их устройства, если только можно пренебречь трением, работа, приложенная к машине, равна работе, произведенной машиной.**

Вопросы и задачи.

1. Назовите две или три машины, употребляемые в домашнем быту, у которых выигрыш в силе меньше единицы.

2. Разберите несколько видов ручного труда (как-то: земляные работы в твердой и мягкой почве, рубка или пилка дров, косьба, жатва и т. д.).

Посмотрите, для всех ли этих работ оправдывается определение $W = FS$. Не является ли именно FS величиной, за которую **платят при всех этих работах?**

3. Сила, приложенная к колесу, имеющему 3 *м* в диаметре, уравновешивает груз в 150 *кг*, привешенный к валу. Найдите диаметр вала.

4. Сундук, весящий 750 *кг*, требуется поднять на высоту 1,5 *м*. Сила, которую есть возможность приложить, равна всего 125 *кг*. Какова будет кратчайшая наклонная плоскость, которою можно воспользоваться в данном случае?

5. Бочку весом в 150 *кг* вкатили по деревянной доске длиной в 4 *м* на крыльцо, находящееся на высоте 1 *м*. Какая сила была приложена в направлении, параллельном доске?

6. В сложном вороте, изображенном на рис. 135, рукоятка имеет в длину 70 *см*, а диаметр вала равен 20 *см*. В малом зубчатом колесе — 20 зубцов, а в большом—60. Каков выигрыш в силе у этого ворота?

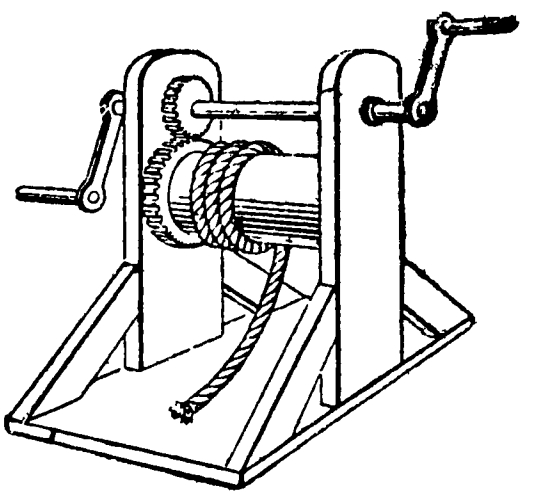


Рис. 135. Ворот с зубчатыми колесами.

7. В маленьком подъемном винте на каждый *см* приходится 8 витков. Какой выигрыш в силе можно получить, употребляя вместе с винтом рычаг длиною в 10 *см*. (Считайте π равным 3,1416.)

8. Винт маслодельного пресса имеет 2 витка на 1 *см*. А длина каждой рукоятки — 15 *см*. Какое давление можно было бы произвести вращательной силой в 5 *кг*, приложенной к каждой рукоятке, если бы не было трения? (См. рис. 130.)

МОЩНОСТЬ И ЭНЕРГИЯ.

143. Определение мощности. Предположим, что мальчик и взрослый мужчина одновременно работают по нагрузке телеги песком. Мальчику, для того чтобы произвести столько же работы, сколько мужчине, т. е. поднять такое же количество песка на такую же высоту, придется затратить в три раза больше времени, в три раза большее число минут. Очевидно, следовательно, проработанное время не определяет количества проделанной работы. Поэтому время не входит в определение работы. Однако надо же как-то выразить, что мужчина делал в 1 минуту в три раза большую работу, чем мальчик. Поэтому говорят, что мужчина работает в три раза интенсивнее мальчика. Интенсивность работы называется мощностью или активностью. Если обозначить мощность через P, произведенную работу через W, а время, потребное для производства этой работы, через t, то

$$P = \frac{W}{t} \text{ или } P = \frac{FS}{t} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (10)$$

144. Лошадиная сила. Джемс Уатт (1736 — 1819), изобретатель паровой машины, полагал, что средняя лошадь может произвести 75 *кг-м* работы в секунду. Повидимому, эта цифра значительно преувеличена, однако все же с тех пор за единицу мощности принимают 75 *кг-м* в секунду. Это — так называемая лошадиная сила (л. с.). Обычно мощность паровых машин выражают в лошадиных силах. Мощность обыкновенного паровоза — от 500 до 1 000 лошадиных сил. Мощность стационарных паровых машин и крупнейших пароходных двигателей доходит часто до 5 000 — 20 000 л. с.

Сила средней лошади — около $^3/_4$ л. с., а среднего мужчины около $^1/_7$ л. с.

145. Килоуатт. В метрической системе абсолютной единицей работы является эрг. Соответствующая единица мощности — один эрг в секунду. Однако эта единица так мала, что на практике обычно употребляют единицу в 10 000 000 раз большую, т. е. один джоуль в сек. (см. § 126, стр. 96) Эта единица мощности называется, в честь Джемса Уатта, у а т т о м. Мощность динамомашин и электрических моторов почти всегда выражают в килоуаттах; 1 килоуатт равен 1 000 уаттам. В последнее время даже мощность паровых машин все чаще и чаще начинают выражать в килоуаттах, а не в лошадиных силах. Лошадиная сила эквивалентна 746 уаттам, т. е. около $^3/_4$ килоуатта.

146. Определение энергии. Энергия тела определяется его способностью производить работу. Обыкновенно неодушевленные предметы обладают энергией только тогда, если над ними когда-либо прежде была произведена некоторая работа. Положим, напр., что груз в 1 *кг* из положения 1 на рис. 136 был поднят на 1 *м* и за крючок *H* подвешен к веревке, проходящей через не имеющий трения блок *p*. Другой конец веревки привязан к другому грузу *B*, тоже весом в 1 *кг*. Операция подъема *A* из положения 1 в положение 2 требует затраты работы в 1 *кг-м* (100 000 *г-см*, или 98 000 000 эргов). Но зато в положении 2 *м* сам груз *A* обладает некоторой способностью производить работу, которой он не обладал в положении 1: стоит толкнуть *A* книзу с самой ничтожной силой, как он сам собой устремится вниз и вернется в положение 1; при этом груз *B* поднимется на высоту одного метра. Другими словами, *A* произведет над *B* такое же количество работы, какое первоначально было произведено над ним самим.

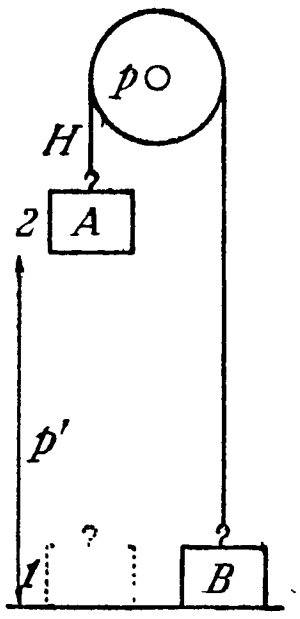


Рис. 136. Иллюстрация потенциальной энергии.

147. Потенциальная и кинетическая энергия. Тело может обладать способностью производить работу, не только будучи в приподнятом положении, но и приобретя каким-нибудь образом некоторую скорость. Напр., тяжелое маховое колесо заставляет машину работать некоторое время и после прекращения тяги; пуля, вылетевшая при выстреле кверху, поднимается благодаря сообщенной ей скорости на большую высоту, преодолевая силу тяжести.

Вообще, всякое движущееся тело может подняться кверху, преодолевая силу тяжести, может, сталкиваясь с другими телами, заставить их двигаться и, вообще, способно преодолевать всевозможные сопротивления. Энергию, которой тело обладает благодаря выгодному положению, называют «потенциальной энергией». В отличие от этого энергию, появляющуюся у тела, когда оно движется, называют «кинетической энергией». К потенциальной энергии относится энергия поднятых грузов, сжатых или натянутых пружин, согнутых дуг и т. д. Одним словом, потенциальная энергия — это энергия положения, а кинетическая энергия — энергия движения.

148. Превращения потенциальной и кинетической энергии. На примере качающегося маятника или колеблющегося груза, привязанного к веревке, очень ясно можно проследить, как энергия, сообщенная телу, может переходить из кинетической в потенциальную и обратно. Когда чечевица маятника находится в покое, в самом низком положении, она не обладает никакой энергией, ни того, ни другого типа, так как, с одной стороны, она занимает самое низкое положение, а с другой — не обладает никакой скоростью. Переводя чечевицу в положение A (рис. 137), в самую высокую точку пути, мы затрачиваем некоторую работу, равную произведению веса чечевицы в *г* на путь AD в *см*. Другими словами, в чечевице накапливается это количество потенциальной энергии. Когда же теперь чечевица опускается в положение C, ее потенциальная энергия оказывается целиком превращенной в кинетическую. Кинетическая энергия в C в точности равна потенциальной энергии в A. Это видно из того факта, что, при полном отсутствии трения, чечевица поднимается до положения B такого, что $BE = AD$. Отсюда ясно, что в крайних точках пути вся энергия маятника — потенциальная, а в середине — вся она кинетическая. В промежуточных положениях часть энергии — потенциальная, часть — кинетическая, но всегда сумма обоих видов энергии равна первоначальной потенциальной энергии.

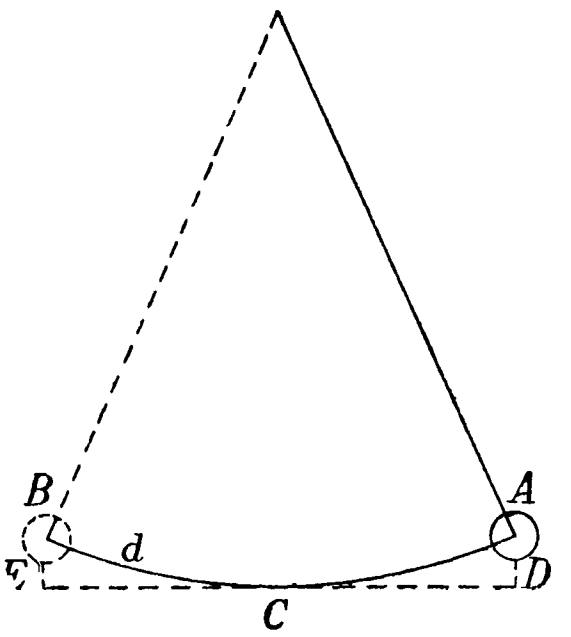


Рис. 137. Превращения потенциальной и кинетической энергии.

Подвесим к тонкой, длинной спирали (рис. 138) небольшой груз. Затем рукой приведем груз в положение 2; для этого нам придется затратить некоторую энергию, и груз приобретет некоторую потенциальную энергию. Если затем внезапно выпустить груз из рук, он медленно начнет опускаться вниз. В положении 3 вся энергия груза — кинетическая. При переходе груза в положение 4, его кинетическая энергия превращается в потенциальную энергию натянутой пружины, которая затем поднимает груз в положение 5, где вся энергия опять переходит в кинетическую. Кинетическая энергия груза в положении 5 производит работу, поднимая груз до положения 6, где вся энергия груза опять переходит в потенциальную форму, как в положении 2.

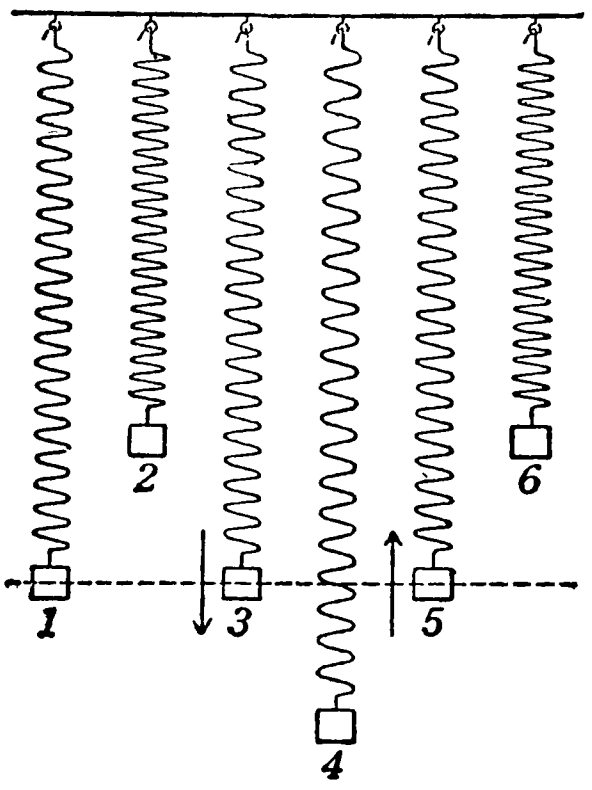


Рис. 138. Превращения потенциальной и кинетической энергии.

На стр. 78 изображен копер, служащий для вколачивания больших свай в землю. Машина поднимает очень большой груз на различные высоты, а оттуда он свободно падает и производит работу.

149. Вывод общего закона машин, не имеющих трения. Разбирая закон машин, мы пришли к заключению, что работа действующей

силы всегда равна работе сопротивления. При этом мы сделали два важных предположения: во-первых — что можно пренебречь трением, во-вторых — что все движения или равномерны, или достаточно медленны, чтобы не появлялось никаких заметных скоростей. Другими словами, мы предполагали, что работа действующей силы была затрачена только на подъем грузов или на сжатие пружин, т. е. на накопление потенциальной энергии. Если не сделать второго предположения, то, как покажет очень простой опыт, наш вывод придется несколько видоизменить.

Положим, например, что вместо медленного подъема груза в 500 *г* с помощью пружинных весов мы резко рванем его вверх. При медленном подъеме весы показывали 500 *г*, а теперь они покажут значительно больше, — при достаточно внезапном подъеме, быть может, даже несколько тысяч *г*. Это происходит потому, что теперь действующей силе приходится преодолевать не только сопротивление силы тяжести, равное 500 *г*, а еще и сопротивление инерции тела при сообщении телу большой скорости. Работа, произведенная при сообщении телу скорости, всегда превращается в кинетическую энергию тела; работа, затраченная на преодоление силы тяжести, — в потенциальную энергию поднятого груза. Таким образом, для всех механизмов, служащих для превращения работы, в которых можно пренебречь трением, как при быстрых, так и при медленных движениях, имеет место закон:

Работа силы, действующей на какое-нибудь тело, равна сумме накопившихся в теле потенциальной и кинетической энергий.

В машинах, работающих против силы тяжести, тело обычно в начале операции находится в покое и в конце опять приходит в состояние покоя. Таким образом, в результате всей операции кинетическая энергия тела равна нулю. Значит, в этом случае произведенная работа равна произведению веса поднятого тела на высоту подъема, независимо от того, быстро ли, или медленно был совершен этот подъем. В начале подъема тело получает кинетическую энергию, но целиком отдает ее при остановке.

150. Мера потенциальной энергии. Мерой потенциальной энергии всякого поднятого тела, напр , приподнятого копра, является работа, затраченная на подъем тела. Так, напр., обозначая через h высоту в *см*, через W — вес тела в *г*, получим для потенциальной энергии (Ep) поднятой массы выражение

$$Ep = Wh \text{ г-см} \quad . . . . . (11)$$

151. Мера кинетической энергии. Сила земного притяжения действует на Mg с силой Mg дин. Желая выразить потенциальную энергию в эргах, а не в *г-см*, получим:

$$Ep = Mgh \text{ эргов.} \quad . . . . . (12)$$

При падении массы M с высоты h вся ее энергия переходит в кинетическую. Значит, Mgh эргов — это также и величина кинетической энергии, которой обладает, напр., движущийся груз в копре в момент удара по свае.

Можно написать выражение для этой кинетической энергии, куда не войдет высота h, но зато войдет скорость, приобретенная телом [(см. ур-ие

(7) стр. 107)]; для этого заменим h его выражением из формулы: $h = \frac{v_2}{2g}$. Отсюда для кинетической энергии (Ek) получается выражение:

$$Ek = {}^1/_2\ Mv^2 \text{ эргов.}$$

Так как выражение это не зависит от способа, которым тело приобрело скорость, оно является самым общим выражением для кинетической энергии любого движущегося тела, в зависимости от его массы и скорости.

Так, например, кинетическая энергия пули, весящей 100 *г* и летящей со скоростью 10 000 *см* в секунду, есть

$$Ek = {}^1/_2 \times 100 \times (10\,000)^2 = 50\,000\,000\,000 \text{ эргов.}$$

Но 1 *г-см* эквивалентен 980 эргам. Значит, энергия этой пули равна $\frac{5\,000\,000\,000}{980} = 5\,102\,000$ *г-см*, или 51,02 *кг-м*. Отсюда мы заключаем, что работа пороха, толкавшего пулю при ее движении в дуле винтовки и сообщившего ей скорость в 100 *м* в секунду, была равна 51,02 *кг-м*. В общем виде, если M — выражена в *г*, а v — в *см/сек*. $Ek. = {}^1/_2 \frac{Mv^2}{980}$ *г-см*.

Резюме. **Мощность, или активность, — это быстрота производства работы, т. е. $P = \frac{W}{t}$.**

Одна лошадиная сила = 75 *кг-м* в секунду = 746 уаттам = $^3/_4$ киловатт. Один уатт — 10 000 000 эргов в сек. = 1 джоуль в сек. Энергия тела — это его способность производить работу. Кинетическая энергия — это энергия движения, потенциальная энергия — энергия положения.

Общий закон идеальных машин без трения, сообщающих массе скорость. Работа силы, действующей на какую-нибудь массу, равна сумме потенциальной и кинетической энергий, накопившихся в массе, подвергавшейся воздействию.

Потенциальная энергия поднятого груза равна произведению его веса на его высоту, т. е. $Ep = Wh$ гравитационных единиц $= Mgh$ абсолютных единиц.

Кинетическая энергия движущейся массы равна $\frac{Mv^2}{2}$ гравитационых единиц или $\frac{Mv^2}{2g}$ абсолютных единиц.

Вопросы и задачи.

1. Электрический мотор поднимает гранитную глыбу, весящую 3 500 *кг*, на 30 *м* в 2 мин. С какой мощностью работает мотор? Выразите эту мощность в лошадиных силах.

2. Сколько нужно лошадиных сил, чтобы в 10 мин. с равномерной скоростью втащить груз в 5 *т* на вершину холма, высотой в 20 *м*?

3. Сколько нужно лошадиных сил, чтобы заставить автомобиль двигаться по гладкой дороге со скоростью 30 *км* в час, если трение равно 60 *кг*?

4. На ферме трактор двигал артельный плуг со скоростью 2,5 *км* в час, причем средняя развиваемая им тяга равнялась 750 *кг*. С какой средней мощностью (в л. с.) работал трактор?

5. Кусок динамита обладает способностью производить большую работу при взрыве. Какова его энергия до того, как произошел взрыв,—потенциальная или кинетическая?

6. Объясните, почему пользуются пескодувной машиной для очистки стен каменных зданий, при выделке глазурованного стекла, при вырезывании рисунка на стеклянной посуде?

7. Сколько надо затратить работы, чтобы поднять копер, весящий 250 *кг*, на 10 *м*? Сколько в нем при этом накапливается потенциальной энергии? Какую работу производит он при падении? Какая сила, в среднем, действует на сваю, если падающая масса загоняет сваю в землю на $^1/_6$ *м*.

8. Река при своем течении образует водопад вышиной в 7 *м*. Измерения показывают, что расход воды в нем равен 16 *куб. м* в минуту. Какую мощность можно получить от водопада? Выразите ее в *кг-м* в секунду, в лошадиных силах.

9. Пуля, весящая 10 *г*, вылетела из винтовки, весящей 5 *кг*, со скоростью 700 *м* в секунду. Какова была скорость отдачи винтовки? (Воспользуйтесь третьим законом Ньютона).

10. Докажите, что энергия пули превосходит энергию винтовки.

ТРЕНИЕ.

152. Трение всегда вызывает потерю работы. Все опыты, рассмотренные в этой главе, были поставлены так, что можно было или пренебречь трением, или исключить его. При этом условии, все опыты приводили к одному и тому же выводу, а именно: работа, произведенная действующей силой, равна сумме накопившейся кинетической и потенциальной энергии (§ 149). Однако при наличии трения закон этот оказывается неверным. В этом случае действующая сила всегда несколько больше суммы появившейся кинетической и потенциальной энергии. Например. Если протащить брусок по горизонтальной поверхности стола, то в конце движения брусок не будет иметь никакой скорости, т. е. никакой кинетической энергии. Далее. Так как брусок не был приподнят и не подвергся упругому натяжению, то у него нет и потенциальной энергии. Мы никаким способом не сможем получить от бруска больше работы, после того как его двигали, чем до этого. Отсюда ясно, что вся работа, употребленная на передвижение бруска при наличии трения стола, была потерянной работой. Вообще, опыт показывает, что никогда нельзя получить обратно работу, совершенную против сил трения.

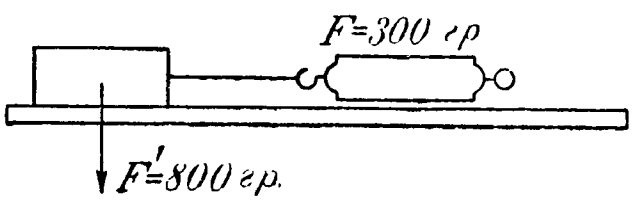


Рис. 139. Коэффициент трения равен отношению F к F'.

Раньше, чем разобрать, куда девается эта потерянная работа, рассмотрим, от чего зависит трение, и выведем некоторые законы, полученные из опыта для тех случаев, когда имеется трение.

153. Коэффициент трения. Пусть F обозначает силу, параллельную некоторой плоскости и необходимую для поддержаний тела, прижатого с силой F' к этой плоскости, в состоянии равномерного движения. Тогда, для малых скоростей отношение $\frac{F}{F'}$ зависит только от вида соприкасающихся поверхностей и совсем не зависит от площади или от скорости движения. Отношение $\frac{F}{F'}$ называется коэффициентом трения данных веществ. Так, напр., если (рис. 139) $F = 300$ *г*, а $F' = 800$ *г*, коэффициент трения $= \frac{300}{800} = 0{,}375$. Коэффициент железа по железу равен, приблизительно, 0,2; дуба по дубу — около 0,4.

154. Трение при катании. Трение при скольжении вызвано главным образом маленькими неровностями на соприкасающихся поверхностях. Когда круглое твердое тело катится по гладкой поверхности, сопротивление

трения, вообще говоря, гораздо меньше, чем при скольжении этого тела. Напр. коэффициент трения для чугунных колес, катящихся по железным

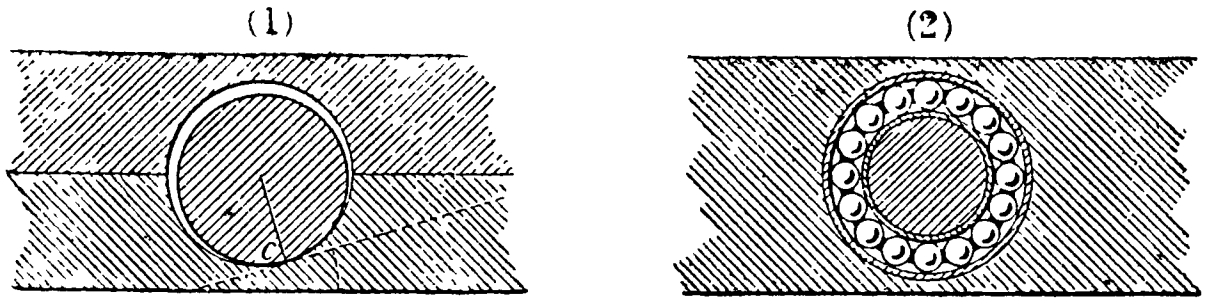


Рис. 140. Трение в подшипниках: (1) обыкновенные подшипники, (2) шариковые подшипники.

рельсам, равен, примерно, 0,002, т. е. $\frac{1}{100}$ коэффициента трения железа по железу при скольжении. Это значит, что, для того чтобы поддерживать в движении вагон, весящий 250 *кг*, необходима сила в 0,5 *кг*. Однако при обыкновенных колесах трение происходит не только от катания, но частично и от скольжения: хотя ободок колеса катится по рельсам, но зато вал постоянно скользит около некоторой точки

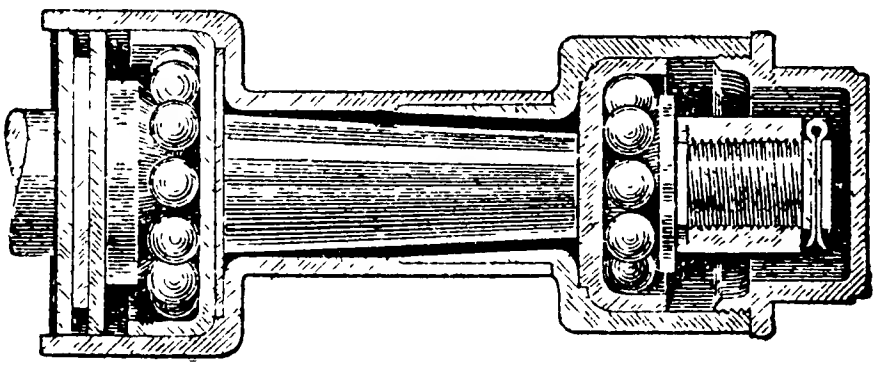


Рис. 141. Педаль велосипеда.

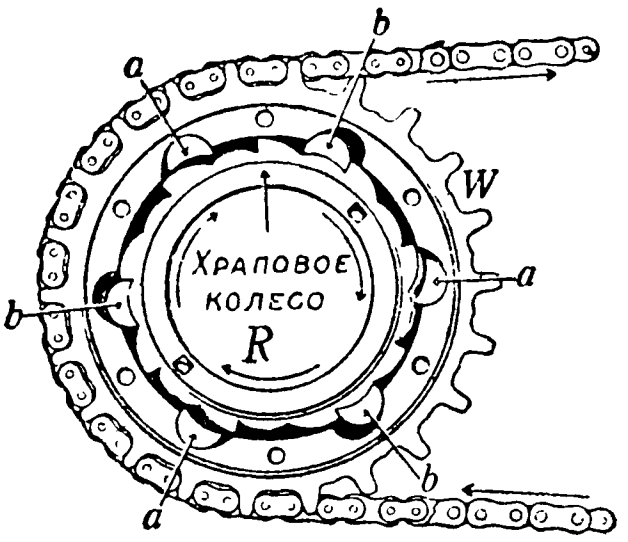


Рис. 142. Храповик свободного колеса.

(рис. 140 (1) поверхности шипа вала; часто обкладку шипа делают из латуни или из металла баббита, так как это уменьшает коэффициент трения.

Громадное преимущество шариковых подшипников (рис. 140 (2) состоит в том, что исчезает почти всякое скольжение: оно заменяется катанием шариков по втулке и оси. На рис. 141 показано устройство велосипедных педалей с шариковыми подшипниками; храповое свободное колесо изображено на рис. 142. Собачки *a* и *b* позволяют остановить педали и колесо W, в то время как задняя ось продолжает вертеться. На рис. 143 показаны роликовые подшипники; белым цветом обозначены конуса из чрезвычайно твердой стали, на которых покоятся цилиндрические подшипники; масло, жиры, графит и другие смазочные вещества, уменьшая трение предохраняют подшипники от быстрого изнашивания.

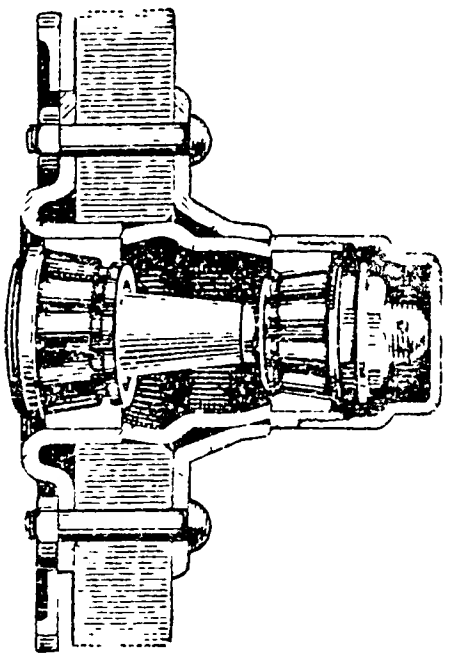


Рис. 143. Роликовые подшипники переднего колеса автомобиля.

155. Трение в жидкостях и газах. Когда твердое тело движется в жидкости или газе, — напр., когда пуля летит по воздуху или корабль плывет по воде, — сопротивление среды вовсе не оказывается независимым от скорости, как при соприкосновении твердых тел. Здесь сопротивление возрастает с возрастанием скорости. Пока скорости остаются малыми, сопротивление увеличивается пропорционально квадрату скорости, при больших скоростях — значительно быстрее. Вот почему так дорого обходится быстрое движение поездов: сопротивление воздуха, при медленном движении поезда составляющее очень незна-

чительную часть общего сопротивления, при больших скоростях играет главную роль. Обычно считается, что сопротивление движению быстроходных пароходов возрастает пропорционально кубу скоростей. Так, например, «Цедрик», курсирующий по линии Уайт Стар, мощность которого равна 14 000 л. с., развивает скорость в 17 узлов. Его вес при полной нагрузке — около 38 000 *т*. В то же время «Мавритания», курсирующая по линии «Кюнард», развивающая скорость в 25 узлов, имеет машину мощностью в 70 000 л. с., хотя вес ее в груженом виде равен только 32 500 *т*.

Резюме. **Работа, идущая на преодоление трения, целиком теряется. Коэффициентом трения называют отношение силы тяги, необходимой для преодоления трения, к нормальной силе, прижимающей соприкасающиеся поверхности друг к другу.**

Вопросы и задачи.

1. Почему, когда трогается тяжелый поезд, рельсы часто посыпают песком?
2. В каком смысле трение оказывается полезным при подъеме зданий домкратом? В каком смысле оно вредит в этом случае?
3. Почему течение реки в середине быстрее, чем у берегов?
4. Почему, когда нагруженная телега уже тронулась с места, ее все-таки все время приходится тянуть?
5. Какую пользу приносит трение в обыденной жизни? Какой вред? Могли бы мы обходиться без трения?
6. Назовите три способа уменьшать трение в машинах.
7. Каков коэффициент трения латуни по латуни, если для поддержания куска латуни весом в 100 *кг* в равномерном горизонтальном скольжении по латунному жолобу нужна сила в 12 *кг*?
8. Коэффициент трения между бруском и столом равен 0,3. Какая сила потребуется, чтобы равномерно двигать брусок, весящий 500 *г*?
9. Сколько нужно лошадиных сил, чтобы по горизонтальной поверхности тянуть тело, весящее 5 *т*, со скоростью 6 *км* в час, если коэффициент трения равен 0,2?

ПОЛЕЗНОЕ ДЕЙСТВИЕ.

156. Определение коэффициента полезного действия. Полное отсутствие трения может быть только в идеальной машине. Во всех же действительно существующих машинах работа действующей силы всегда превосходит накопившийся запас кинетической и потенциальной энергии на величину, равную работе против трения. Мы видели выше, что эта работа — потерянная, т. е. она никогда не может быть получена обратно. В противоположность этому появившийся запас энергии, представляющий собою работу, которая может быть получена обратно, называется полезной работой. При устройстве машин большей частью стремятся сделать полезную работу возможно большей частью всей затраченной работы. Отношение полезной работы ко всей произведенной работе называется коэффициентом полезного действия (к. п. д.) машины. Таким образом

$$\text{к.п.д.} = \frac{\text{произведенная полезная работа}}{\text{вся произведенная работа.}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (14)$$

Так, напр., рассмотрим систему блоков на рис. 114. Положим, что для медленного подъема груза в 240 *г* в R, к E надо приложить груз в 50 *г*. Работа, совершаемая грузом в 50 *г* при передвижении E

на 1 *см*, — равна 50 × 1 *г-см*. В то же время полезная работа равна 240 × $^1/_6$ *г-см*, значит, коэффициент полезного действия есть

$$\frac{240 \times {}^1/_6}{50 \times 1} = \frac{4}{5} = 80\%.$$

157. Коэффициенты полезного действия некоторых простейших машин. В простых рычагах трение обычно настолько мало, что им можно пренебречь. Поэтому коэффициент полезного действия этих машин равен, приблизительно, 100%. Для наклонных плоскостей трение тоже очень мало, к. п. д. лежит между 90 и 100%. К. п. д. полиспаста с несколькими подвижными блоками обычно значительно меньше, он меняется от 40 до 60%. В подъемном винте трение по необходимости очень велико, поэтому, несмотря на громадный выигрыш в силе, к. п. д. часто достигает только 25%. Дифференциальный блок (рис. 134) тоже дает очень большой выигрыш в силе и имеет очень маленький коэффициент полезного действия. Зубчатые колеса, изображенные на рис. 132, и зубчатые цепи, применяющиеся, напр. в велосипедах, тоже являются машинами с сравнительно большим коэффициентом полезного действия, часто превышающим 90%.

158. К. п. д. наливного колеса. Водяные колеса (рис. 144) работают главным образом благодаря потенциальной энергии воды в точке *S*; они приводятся в движение давлением воды на лопатки. Работа, прилагаемая к турбине в каждую секунду, равна произведению веса воды, протекающей через турбину в 1 сек., на высоту падения воды. К. п. д. равен отношению работы, которую турбина может произвести в 1 сек., к работе, прилагаемой к турбине в каждую секунду.

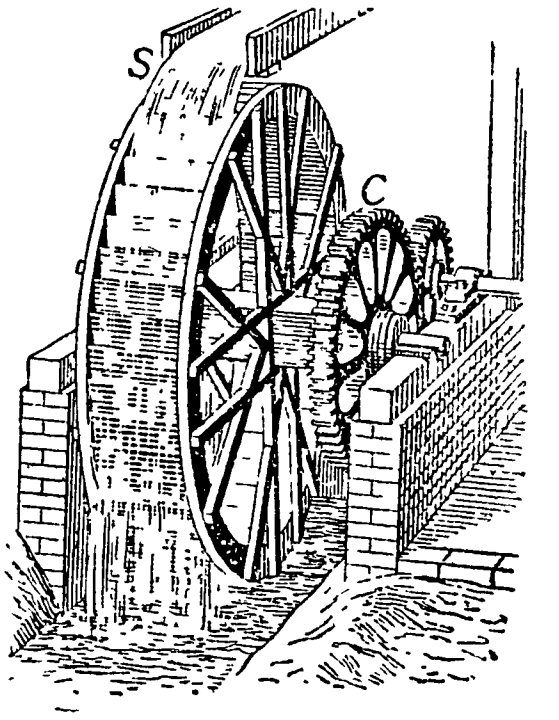


Рис. 144. Наливное водяное колесо.

Такого рода турбины очень распространены в гористых местностях, где много падающей воды и где о б ъ е м воды в реках очень мал. К. п. д. таких турбин очень велик, часто он колеблется от 80 до 90%. Потеря работы происходит не только вследствие трения подшипников и зубчатой передачи (см. *C*), но и потому, что часть воды разбрызгивается, часть же протекает по турбине, вовсе не попадая на лопатки. Это тоже можно рассматривать как потерю на трении, так как вся энергия воды расходуется на внутреннее трение, после того как вода достигает земли.

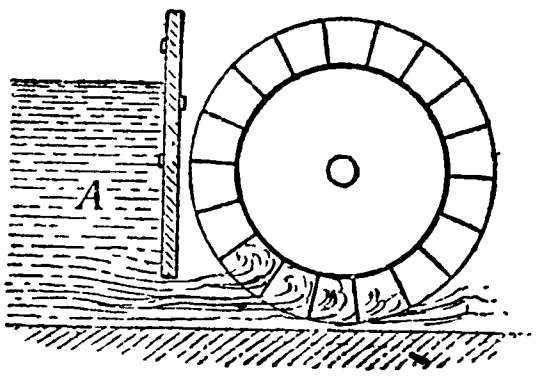


Рис. 145. Подливное водяное колесо.

159. К. п. д. подливного колеса. Старомодные подливные колеса (рис. 145) чрезвычайно распространены в низменных местностях, где падение воды не велико, но зато объем воды в реках очень велик. Этот вид водяных колес пользуется только кинетической энергией воды, протекающей из *A* через лоток. Эти колеса редко превращают в полезную работу больше 25 — 30% потенциальной энергии воды над плотиной. Есть, однако, некоторые новейшие виды подливных колес с очень большим к. п. д. Напр., колесо П е л ь т о н а (рис. 146), построенное в 1880 г. Им широко пользуются как в небольших силовых установках в городах, снабженных водопроводом, так и на гигантских гидростанциях. Часто к. п. д. его достигает 87%. Вода из сопла *O* льется на чашковидные лопатки (см. рис. 146). На одной из крупных гидростанций в Калифорнии колеса Пельтона, 3 *м* в диаметре, при-

водятся в движение струей воды, вытекающей со скоростью 120 *м* в сек. из сопла диаметром в 15 *см*. Высота падения воды достигает здесь — 710 *м*.

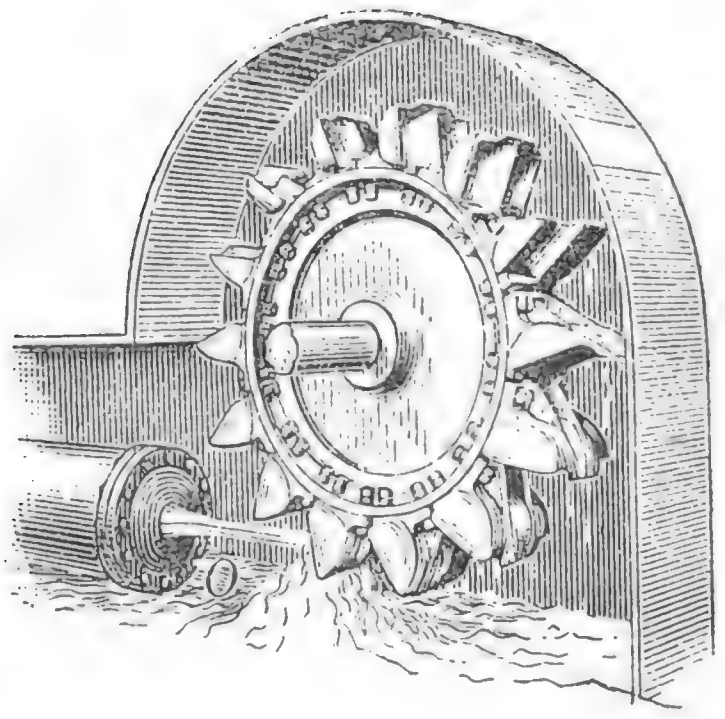
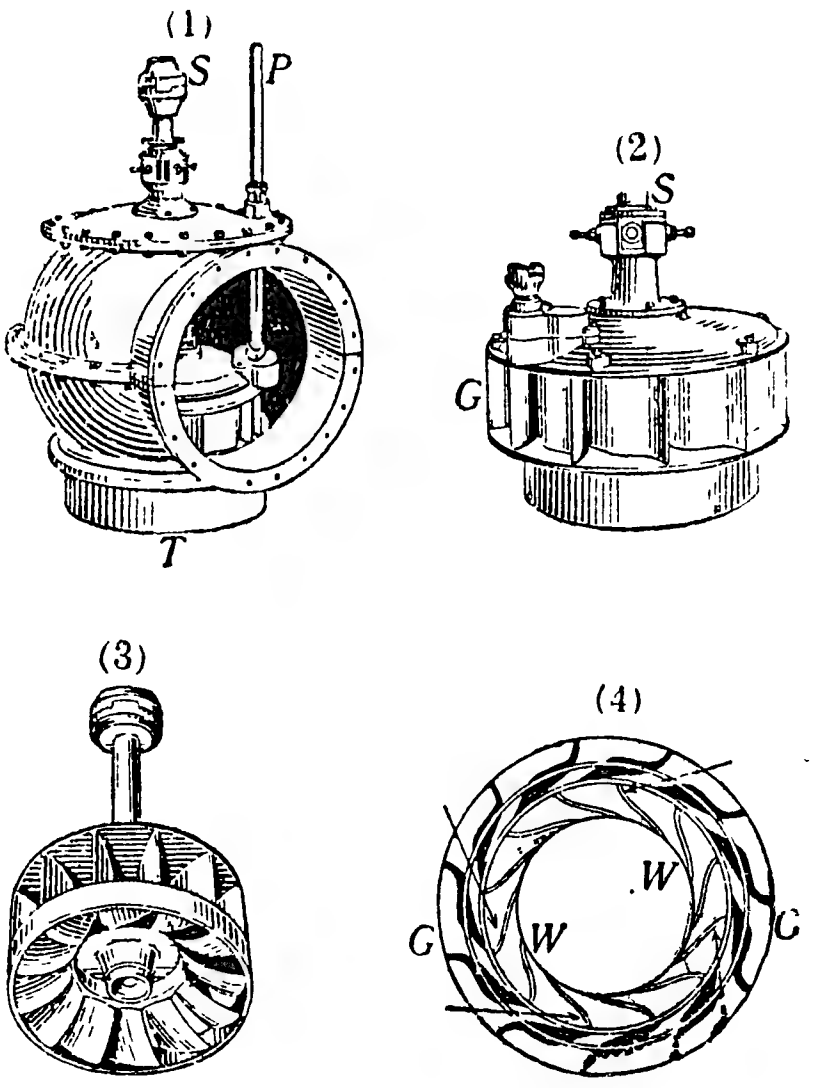


Рис. 146. Водяное колесо Пельтона.

160. К. п. д. водяных турбин. Турбина была изобретена во Франции в 1833 г. В настоящее время она распространена более широко, чем какой-либо другой вид гидравлических колес. Турбина в особом кожухе находится целиком под водой, на дне особой «турбинной шахты». Вращается она в горизонтальной плоскости. На рис. 147 (1) изображен один из видов внешнего кожуха, с турбиной внутри. На рис. 147 (2) мы видим внутренний кожух, *G* — неподвижные лопатки, направляющие воду так, чтобы она попала на лопатки внутреннего колеса под наиболее благоприятным углом. Рис. 147 (3) изображает само колесо, а рис. 147 (4) — разрез колеса и внутреннего кожуха, здесь видно, как вода входит через направляющие лопатки и попадает на лопатки *W*. Отработавшая вода просто стекает вниз, в нижний отводный канал под *T* (рис. 147, 1). Количество воды, протекающее через турбину, можно регулировать с помощью клапана *P* (рис. 147 1), поворачивая который можно увеличивать и уменьшать отверстия между направляющими лопатками *G* (рис. 147,2). На стр. 119 показана современная гигантская турбина. Энергия, ежесекундно затрачиваемая на турбину, равна произведению веса воды, протекающей через турбину, на высоту турбинной шахты. Для таких колес к. п. д. достигает 93%.



Рис, 147. Турбина: 1) внешний кожух, 2) внутренний кожух. 3) вращающаяся часть, 4) сечение.

Резюме. **К. п. д. машины — это отношение добытой в этой машине полезной работы ко всей затраченной работе (т. е. к работе, приложенной к машине). Таким образом**

$$\text{к. п. д.} = \frac{\text{добыча}}{\text{затрата}}.$$

К. п. д. весьма различен для различных простых машин: для простого рычага он почти достигает 100%, а для подъемного винта — равен только 25%.

Вопросы и задачи. [1]

1. Объясните различие между выигрышем в силе машины и ее к. п. д. (2). Как вычисляется тот и другой?

2. Почему к. п. д. подъемного винта мал, а рычага — велик?

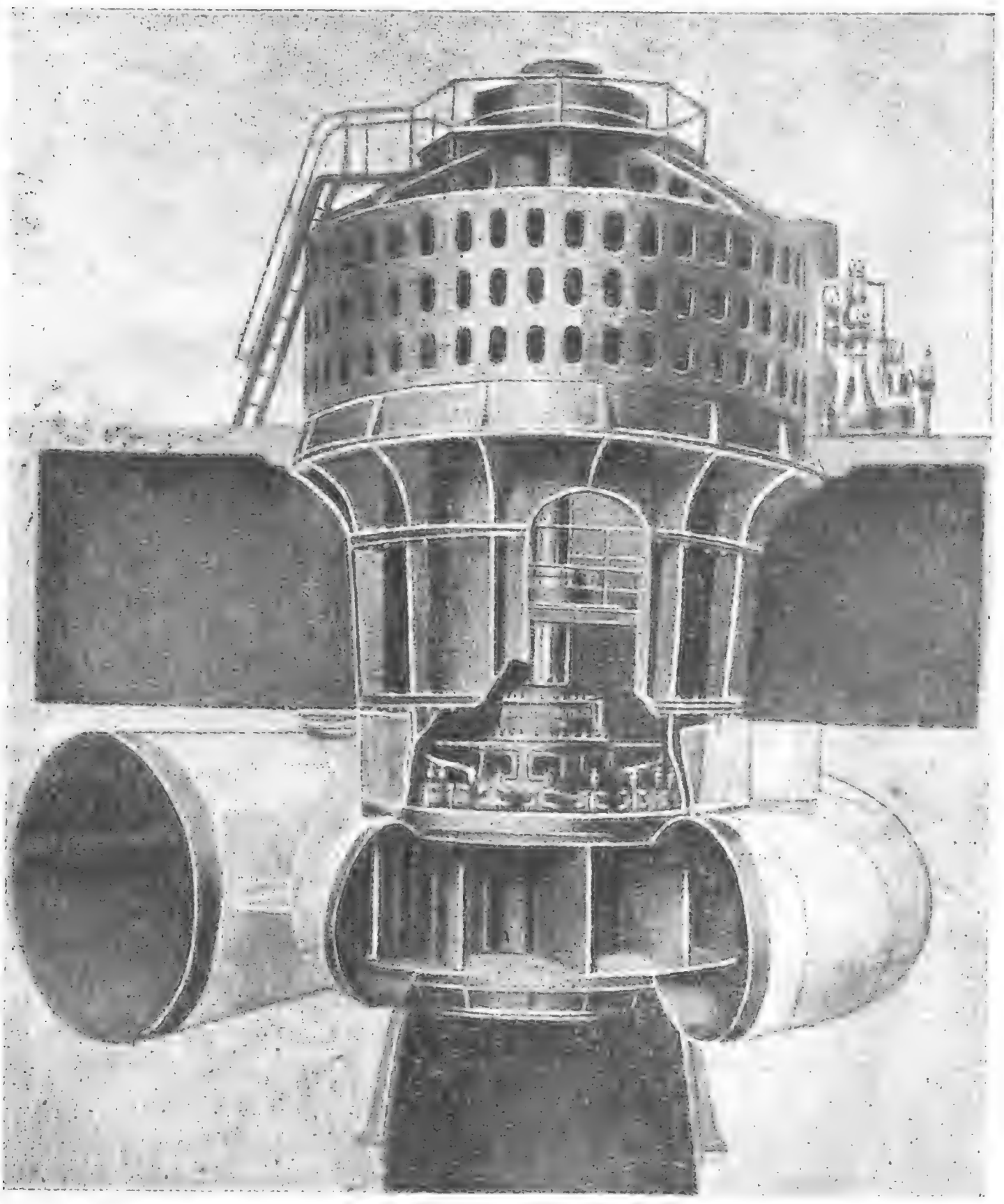
3. Найдите к. п. д. следующей машины: приложена сила в 6 *кг*, ее точка приложения движется на 2,5 *м*. При этом груз в 13 *кг* поднимается на высоту 0,7 *м*.

4. Рассчитайте к. п. д. машины, приводимой в движение мотором мощностью в 2 л. с. и производящей только 5 000 *кг-м* работы в минуту.

5. Для подъема груза в 100 *кг* из колодца глубиной в 20 *м* был исполь-

[1] Дополнительные вопросы и задачи к гл. VII приведены в приложении.

зован ворот. Рабочий у колеса сделал рукой 100 полных оборотов, при длине окружности в 2,5 *м*; работал он со средней силой в 7,5 *кг*. Найдите: 1) к. п. д. этой машины, 2) количество неиспользованных *кг-м* энергии.



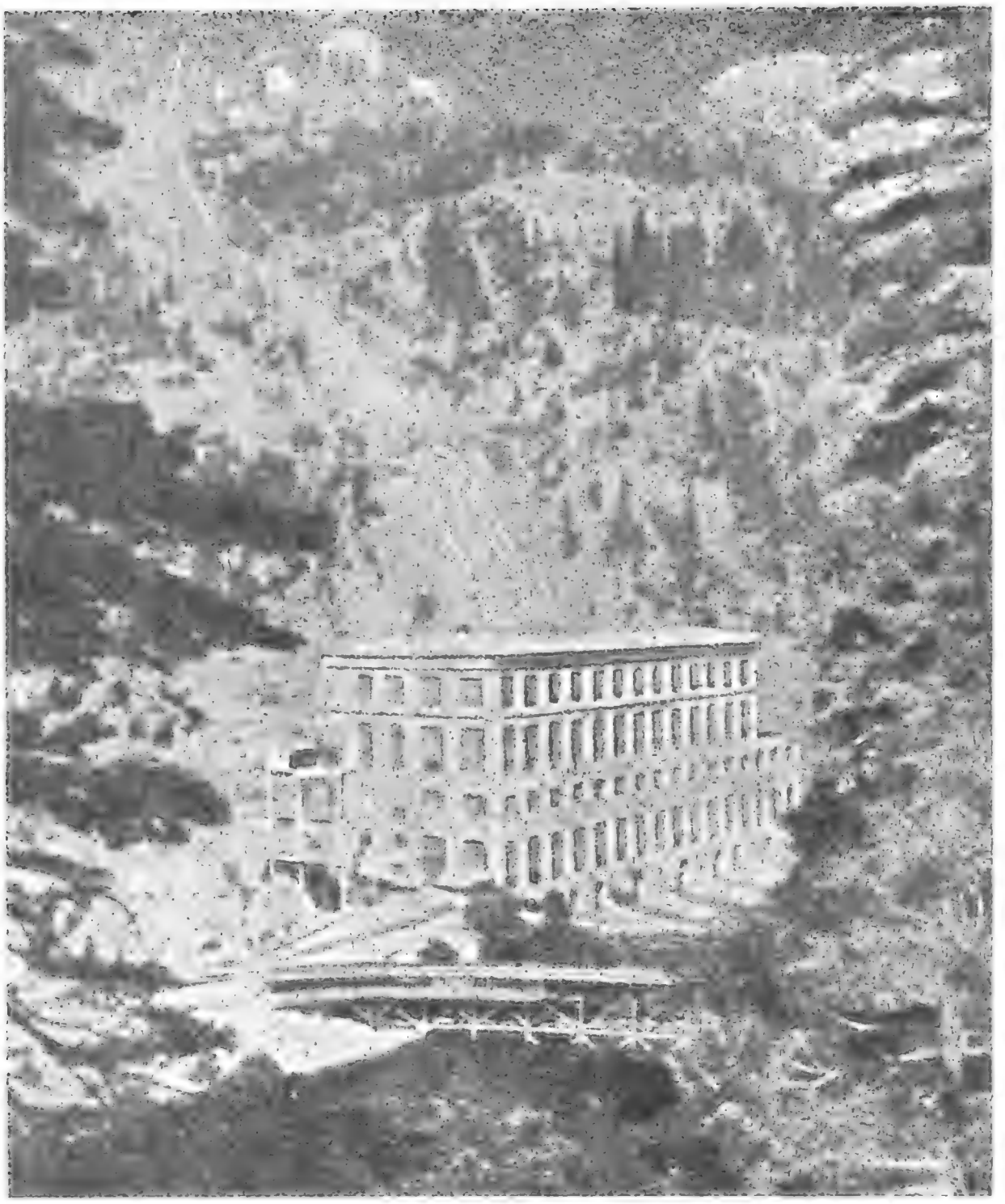
ТУРБО-ГЕНЕРАТОР.

На американском берегу реки Ниагары установлены 3 турбины, аналогичные изображенной на этом рисунке, по 70 000 л. с. каждая. Это — самые мощные турбины в мире. На рисунке ясно видно, как вода входит в просторный кожух, окружающий все колесо, и равномерно ударяет по лопатам гигантского колеса, имеющего 5 *м* в диаметре. Каждая такая турбина весит без генератора 675 000 *кг*, и имеет коэффициент полезного действия 93%. Вал генератора сделан из твердой стали и имеет 85 *см* в диаметре.

6. Паровая лопата, питаемая двигателем в 5 л. с. в час поднимает 200 *т* песку на высоту 5 *м*. Каков к. п. д. паровой лопаты? Какой процент мощности теряется на трение?

7. 1) С какой средней мощностью (в л. с.) работает человек, в минуту грузящий 30 кирпичей с земли в вагон высотой в 1,5 *м*? Вес каждого кирпича — 3,5 *кг*. 2) Каков его к. п. д., если он подбрасывает кирпичи на 0,3 *м* выше, чем нужно?

8. Какая работа была приложена к блоку с канатом, у которого к. п. д. = = 60%, если с помощью этого блока 375 *кг* были подняты на высоту 20 *м*?



ГИДРОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ В ВЕРХНЕЙ СИЕРРЕ.

Это одна из гидроэлектрических силовых станций Южно-Калифорнийской Эдиссоновской компании. На высоте 2 330 *м* находится большой резервуар воды, получаемой с помощью двух гигантских плотин и туннеля через гранитную скалу, имеющего 13 миль в длину. Вертикальное падение воды превышает милю. Оно полностью использовано серией силовых установок. На рисунке изображена одна из них. В ней установлены колеса Пельтона, питаемые трубопроводом в 1 500 *м* в длину (см. гористую часть на рисунке) с вертикальным падением в 710 *м*. Энергия передается на расстояние 241 мили при напряжении в 220 000 вольт.

ГЛАВА VIII.

ТЕРМОМЕТРИЯ. КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСШИРЕНИЯ.

ТЕРМОМЕТРИЯ.

161. Что такое температура. Если при прикосновении к телу мы ощущаем, что оно горячо, то мы привыкли говорить, что его температура высока. Если тело наощупь холодное, мы гово-

рим, что температура его низкая. Таким образом, слово температура употребляется для обозначения степени нагретости тела, состояние которого описывает.

162. Измерение температуры. Насколько нам известно, вплоть до Галилея никто никогда не употреблял никаких специальных инструментов для измерения температуры. Люди только по собственным ощущениям распознавали холод или жару. Однако при некоторых условиях это ощущение температуры является очень ненадежным. Напр., после того как рука была опущена в горячую воду, теплая вода покажется ей холодной. Если же руку предварительно подержать в холодной воде, та же самая теплая вода покажется ей горячей. Человеку, разгоряченному после бега, может показаться, что в комнате тепло, а другому, сидевшему на месте, может в той же комнате быть холодно.

Такого рода затруднения привели к созданию специальных приборов для измерения температуры, так наз. термометров. Действие этих инструментов основано на том, что при нагревании почти все тела расширяются.

163. Термометр Галилея. Первый термометр был изготовлен Галилеем в Падуанском университете в 1592 г. Галилею были хорошо знакомы явления расширения твердых, жидких и газообразных тел. Так как газы расширяются сильнее, чем жидкие и твердые тела, Галилей выбрал в качестве расширяющегося вещества газ. Его прибор изображен на рис. 148.

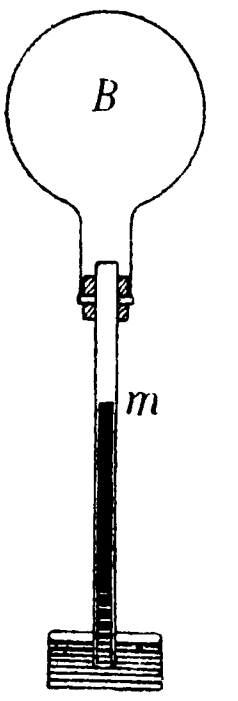


Рис. 148. Расширение воздуха при нагревании.

Колба B, наполненная воздухом, сообщается с водяным манометром m (рис. 148). Достаточно нагреть колбу на бунзеновской горелке или даже просто положить на нее руку, чтобы вода в m сразу же начала опускаться. Это показывает, что давление воздуха в колбе увеличилось с повышением температуры. При охлаждении B льдом или эфиром вода B поднимается.

164. Температура с точки зрения кинетической теории. В § 64 мы выяснили, что давление газа вызвано бомбардировкой стенок сосуда молекулами газа. Так как при небольшом нагревании вряд ли могло увеличиться число молекул газа в колбе B, мы должны отнести увеличение давления газа за счет возрастания скорости того же самого числа молекул. С точки зрения кинетической теории, давление, оказываемое молекулами газа, определяется кинетической энергией, с которой молекулы эти ударяются о стенки сосуда. Повысить температуру значит увеличить среднюю кинетическую энергию молекул. Понизить температуру — уменьшить эту среднюю кинетическую энергию. Таким образом, кинетическая теория дает очень простое и естественное объяснение явления расширения газов при повышении температуры.

165. Устройство ртутного термометра. Через 40 лет после изобретения Галилея француз Рей построил водяной термометр, несколько отличавшийся от водяного термометра Галилея: колбу и часть трубки он заполнил водой. Только через 25 лет после этого появились первые запаянные термометры. И, наконец, ртутные термометры были изобретены только в 1700 г. В виду их большого удоб-

ства они в настоящее время вытеснили все другие виды термометров, по крайней мере для практических целей.

Что такое изменение температуры на один градус, измеренное ртутным термометром? Лучше всего можно это понять из описания самого процесса изготовления и градуировки термометра.

На конце толстостенной стеклянной трубки с небольшим просветом (капилляра) выдувается шарик. Шарик и трубка заполняются ртутью. Температура ртути должна быть несколько выше максимальной температуры, на которую рассчитан термометр. Затем трубка запаивается. При остывании ртуть сжимается, уровень ее в трубке понижается, и сверху остается пустота.

Затем шарик окружается тающим льдом или снегом, как на рис. 149. Ртуть, охлаждаясь, будет сжиматься, а столбик ее понижаться. Когда будет достигнута постоянная температура, ртуть остановится на некотором уровне. Против этого уровня ставится значек 0°. Затем шарик и трубку помещают в пары воды, кипящей при давлении в 76 *см* ртутного столба (см. рис. 150). При этом ртуть поднимается до некоторого нового уровня, на котором и остановится, — против него делается отметка 100°. Затем расстояние между обеими отметками на трубке делят на 100 равных частей. Деления такой же величины наносятся также и над отметкой 100° и под отметкой 0°. Поэтому изменение температуры на 1 градус, измеренное таким термометром, означает изменение температуры, заставляющее ртуть в трубке продвинуться на одно деление; т. е. это изменение температуры заставляет ртуть в шарике расшириться на $\frac{1}{100}$ того объема, на который она расширяется при переходе от температуры тающего льда к температуре кипения при давлении в 76 *см*.

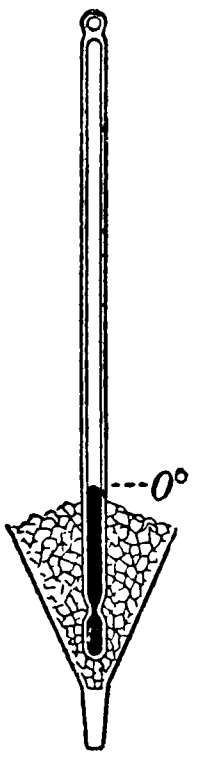


Рис. 149 Нахождение точки 0° при калибрировании термометра.

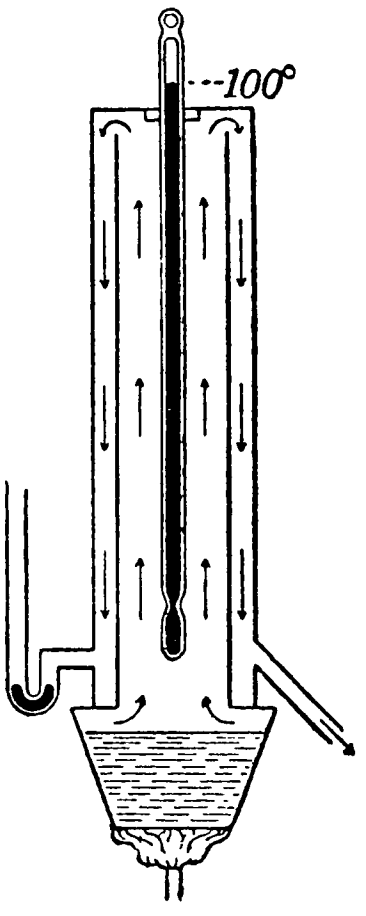


Рис. 150. Нахождение точки 100° при калибрировании термометра.

Такие термометры называются термометрами Цельсия. В научной работе пользуются почти исключительно шкалой Цельсия. Да и для практических целей в большинстве стран, принявших метрическую систему, принята шкала Цельсия. Впервые термометр с этой шкалой был изготовлен Ц е л ь с и е м в Упсале в Швеции в 1742 г. Согласно кинетической теории, повышение температуры жидкости, так же как и газа, означает увеличение средней кинетической энергии молекул; и обратно, понижение температуры означает уменьшение этой средней кинетической энергии.

166. Термометр Фаренгейта. Термометр, употребляемый в Англии и в САСШ в обыденной жизни, отличается от термометра Цельсия

только шкалой. В нем температура тающего льда равна 32°, а не 0°, а температура кипящей воды 80° вместо 100°. Между этими точками шкала разделена на 80 частей. Нуль этой шкалы — это температура смеси одинаковых весовых количеств хлористого аммония и снега. Фаренгейт, изобревший эту шкалу в 1714 г., выбрал эту нулевую температуру, так как он думал, что это самая низкая температура, которую можно достигнуть в лаборатории.

167. Сравнение термометров Цельсия и Фаренгейта. Самый способ градуировки фаренгейтовского и цельсиевого термометров показывает, что 100° на шкале Цельсия обозначают ту же разницу температуры, как 90° на фаренгейтовской шкале (рис. 151). Таким образом, разница температуры в 5 градусов Цельсия равны 18 градусам Фаренгейта. Значит, для перехода от шкалы Ц. к Ф., помножьте показание термометра на 9/5 и прибавьте 32; для перехода от Ф. к Ц. — вычтете 32 и помножьте на 5/9.

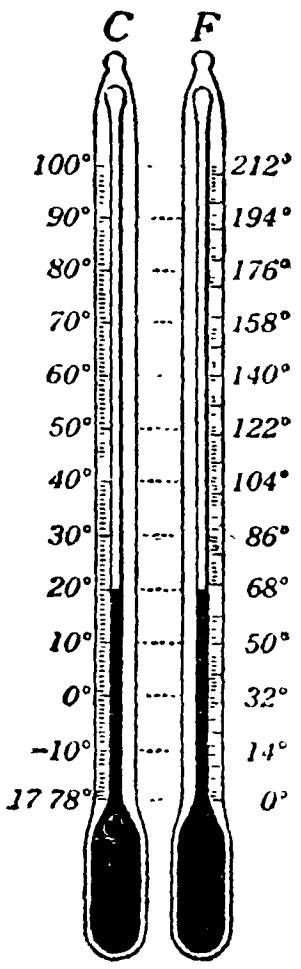


Рис. 151. Шкалы Цельсия и Фаренгейта.

168. Область применимости ртутного термометра. Ртуть замерзает при — 39° С. Поэтому более низкие температуры очень часто измеряют спиртовым термометром, ибо точка замерзания спирта — 130° С. Точка кипения ртути — около 357° С. Значит, ртутные термометры не годятся и для очень высоких температур.

Поэтому и для очень высоких, и для очень низких температур, — в сущности, для всех температур — стандартным инструментом является газовый термометр.

169. Стандартный водородный термометр. Однако современный газовый термометр (рис. 152) сильно отличается от галилеевского (рис. 148). В нем изменение температуры измеряется не приращением объема газа при постоянном давлении, а, наоборот, приращением давления газа при постоянном объеме. Посмотрим вкратце, как градуицирован стандартный водородный термометр Интернационального Бюро Мер и Весов в Париже и как им пользуются.

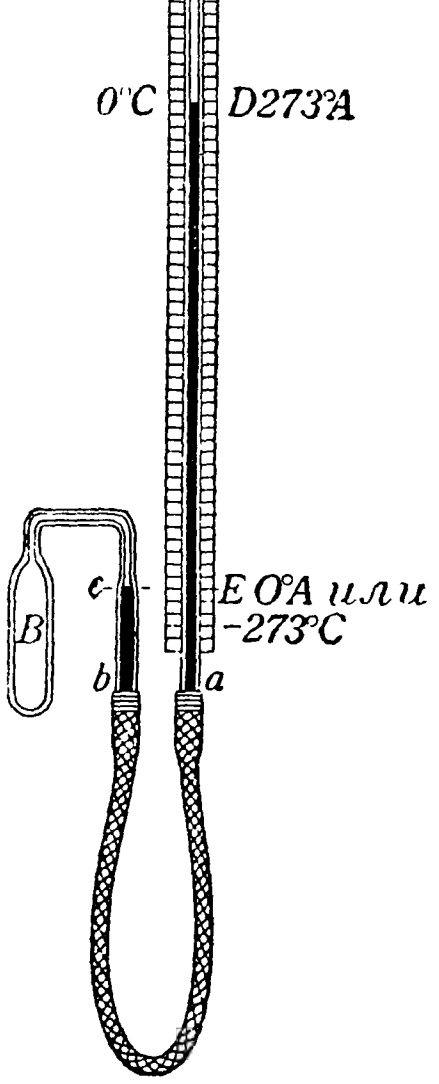


Рис. 152. Стандартный газовый термометр.

Прежде всего, колба B заполняется водородом (рис. 152), а пространство над ртутью в трубке a делается по возможности более совершенной пустотой. Затем B окружают тающим льдом (как на рис. 149), а трубку a опускают или поднимают, пока уровень ртути в трубке b не окажется точно против нанесенной на трубке отметки c.

Так как над D — пустота, то давление водорода, находящегося в колбе B, на поверхности ртути C, как раз уравновешивает давление столба ртути ED. Точку D отмечают на металлической полоске, находящейся позади трубки a. Затем помещают колбу B в паровую ванну, как на рис. 150. Увеличившееся

давление водорода в колбе B сразу заставит ртуть опуститься с уровня c и подняться над D. Однако, поднимая трубку a, можно заставить ртуть в трубке b опять достигнуть уровня C. При этом увеличившееся давление газа в B будет уравновешиваться более высоким столбом ртути — EF вместо ED. Когда газ в B хорошенько прогреется паром, осторожно поднимают трубку a, пока ртуть в b не окажется точно на прежнем уровне C. Затем на металлической полоске делают вторую отметку F точно против нового уровня ртути. Затем обозначают D через 0° C, а F через 100° C. Расстояние между этими отметками делят на 10 равных частей. Точно такие же деления наносят и над 100° и под 0°. Тогда изменение температуры на 1° определяется, как такое изменение температуры, которое изменяет давление газа в B на величину, измеряемую расстоянием между любыми двумя делениями. Оказывается, это расстояние равно 1/273 высоты ED.

Другими словами: изменение температуры на 1° по шкале Цельсия — это изменение температуры, заставляющее давление любого объема водорода измениться на 1/273 его давления при температуре тающего льда (при 0° С).

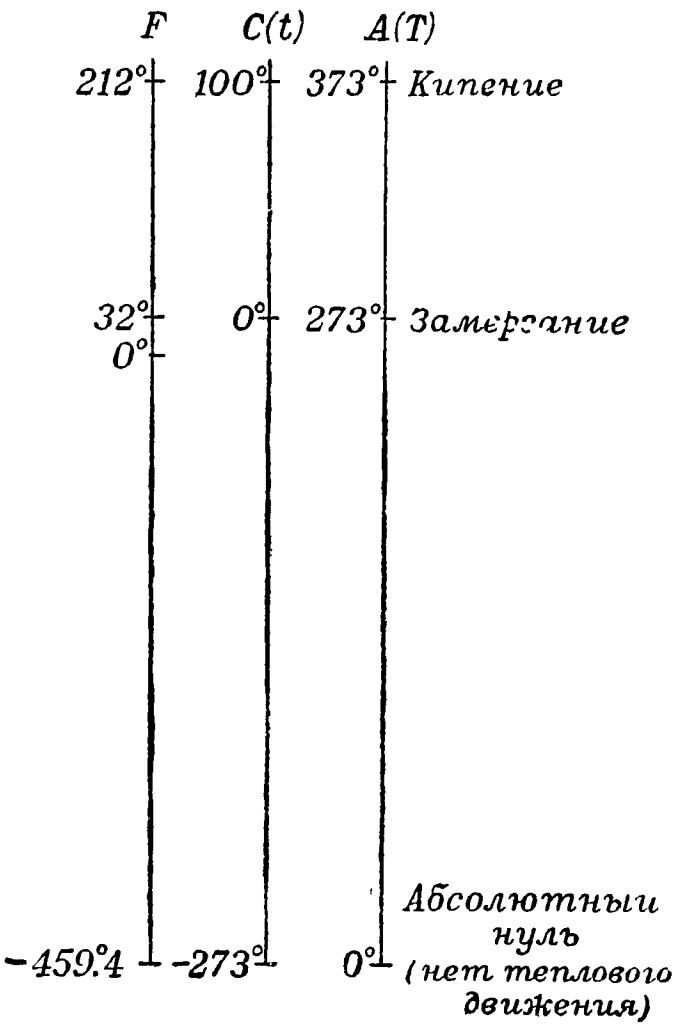


Рис. 153. Сравнение шкал Цельсия, Фаренгейта и абсолютной.

170. Абсолютный нуль и абсолютная температура. Охлаждение водорода на 1°С уменьшает его упругость на 1/273 его упругости при 0°С. Значит, при охлаждении водорода на 273° ниже 0°С упругость его должна бы быть равной нулю. С точки зрения кинетической теории, это была бы температура, при которой прекратилось бы всякое движение молекул водорода. Эта температура носит название абсолютного нуля. Температура, измеряемая от этого нуля, называется абсолютной температурой. Обозначим абсолютную шкалу через A. Тогда имеем 0°С = 273°A, 100°С = 373°A, 15°С = 288°A и т. д. Принято обозначать температуру по шкале Цельсия через t, а по абсолютной шкале — через T.

Итак, имеем:

$$T = t + 273. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Рис. 153 дает сравнение абсолютной шкалы с фаренгейтовской и со шкалой Цельсия. Показания ртутного термометра чрезвычайно мало отличаются от абсолютной шкалы (в промежутке от 0° до 100° — меньше, чем на 2%).

171. Низкие температуры. Достигнуть температуры абсолютного нуля, конечно, невозможно. Однако за последние годы физика приближается к нему быстрыми шагами. Пятьдесят лет тому назад самой низкой достигнутой температурой было — 110°С — температура, достигнутая в 1845 г. Фарадеем при испарении в пустоте смеси эфира

и твердой углекислоты. Но в 1880 г. впервые удалось сгустить воздух в жидкость, причем температура жидкого воздуха, измеренная газовым термометром, оказалась равной — 180°С. При испарении жидкого воздуха в сосуд, все время откачиваемый воздушным насосом, температура его падает, примерно, до — 220°С. Недавно был получен жидкий водород; температура его при атмосферном давлении равна — 243 С°. Все эти низкие температуры измеряются водородными термометрами.

Д ю а р в 1900 г. достиг температуры в — 260°, позволяя жидкому водороду испаряться в сосуд, все время откачиваемый воздушным насосом. В 1923 г. К а м е р л и н г О н е с, пользуясь жидким гелием, достиг температуры в — 272,18°С, температуры менее чем на 1°С выше абсолютного нуля.

Резюме. **Перевод температуры по Цельсию на температуру по Фаренгейту производится путем умножения на 9/5 и прибавления 32.**

Температура по Фаренгейту переводится в температуру по Цельсию путем вычитания 32 и умножения на 5/9. 1° С — это такое изменение температуры, при котором упругость некоторого постоянного объема водорода изменяется на 1/273 упругости этого же об ема при температуре тающего льда (0° С). Абсолютным нулем называется температура, при которой прекратились бы все движения молекул водорода. Абсолютный нуль на 273° С ниже 0° С.

Вопросы и задачи.

1. Почему термометр для измерения температуры тела делается с длинным цилиндрическим кончиком, а не с шариком на конце?
2. Как меняется расстояние между делениями 0° и 100° с изменениями площади поперечного сечения отверстия трубки, если величина колбы не меняется?
3. Нормальная комнатная температура 68° **F**. Сколько это по Цельсию?
4. Какая температура по Цельсию соответствует 0° F?
5. Ртуть замерзает около 4° F. Сколько это по Цельсию?
6. Температура жидкого воздуха — 180° С. Сколько это по Фаренгейту?
7. Изучая газообразные тела, мы приходим к заключению, что существует температура, при которой молекулы находятся в покое и тела, поэтому, не содержат теплоты. Приведите рассуждение, лежащее в основе нашего вывода.
8. Что означает абсолютный нуль температуры?
9. Будет ли платиновый шар вдвое теплее при 233° С, чем при — 20° С. Дайте обоснованный ответ.
10. Какая температура по фаренгейтовской шкале соответствует абсолютному нулю?

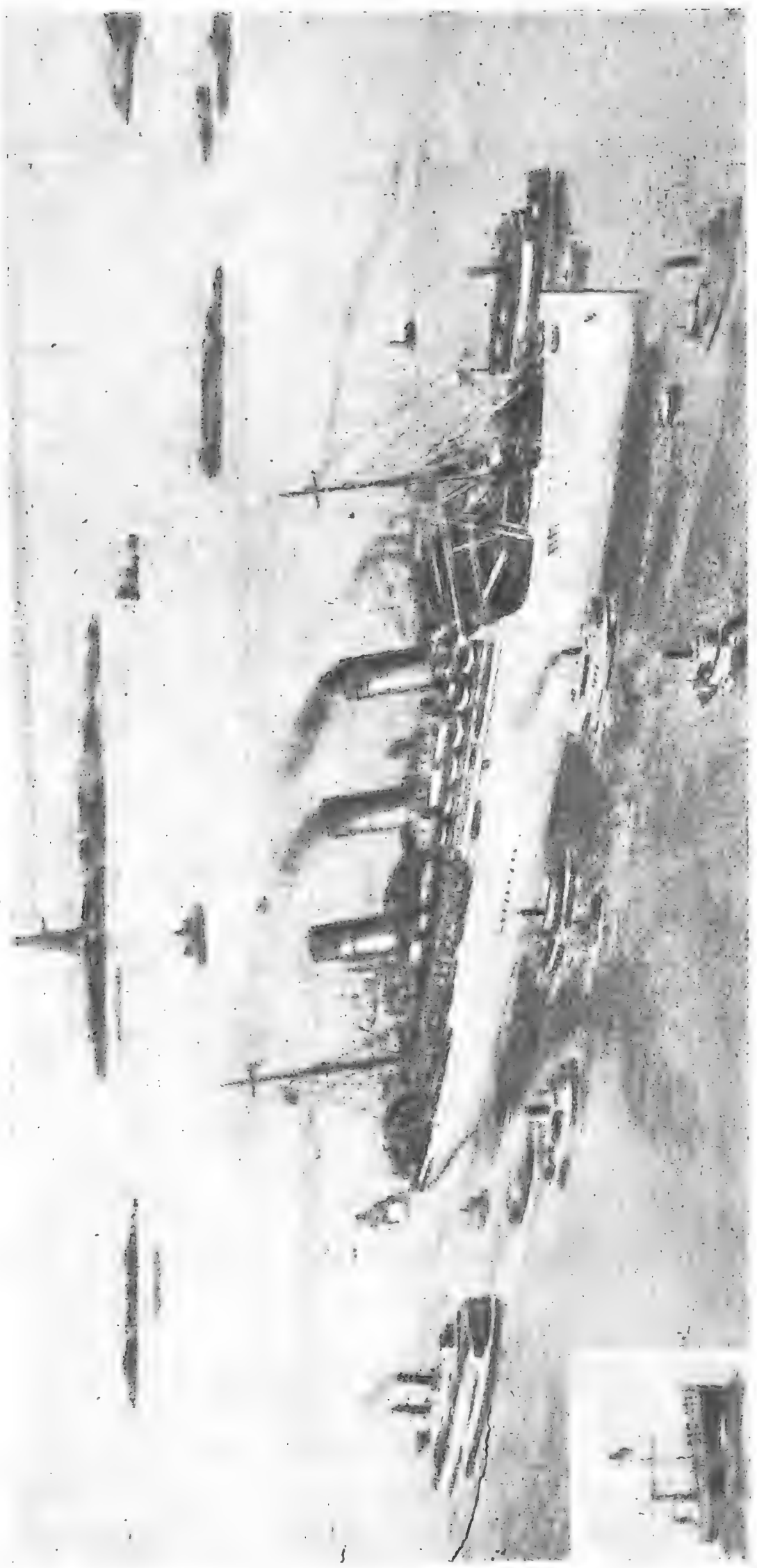
КОЭФФИЦИЕНТ РАСШИРЕНИЯ ГАЗОВ.

172. Законы Шарля и Гей-Люссака. Будем, как в опыте § 169, держать объем газа постоянным и следить за изменением давления газа с повышением температуры. Мы найдем тогда к о э ф ф и ц и е н т р а с ш и р е н и я г а з а п р и п о с т о я н н о м о б ъ е м е, который определяется как о т н о ш е н и е у в е л и ч е н и я д а в л е н и я п р и п о в ы ш е н и и т е м п е р а т у р ы н а 1°С к д а в л е н и ю п р и 0°С.

Эти измерения впервые были проделаны в 1787 г. французским химиком Ш а р л е м. Он нашел, что к о э ф ф и ц и е н т р а с-

ширения при постоянном объеме одинаков для всех газов и равен 1/273. Это положение известно как закон Шарля.

Из определения абсолютной температуры и из закона Шарля



«КЛЕРМОНТА» И «ЛЕВИАФАНА».

Здесь показаны относительные размеры Фультоновского «К л е р м о н т а» и самого большого американского парохода. «К л е р м о н т» имел 50 *м* в длину и 4 *м* в ширину и водоизмещение около 100 тонн. В августе 1807 г. он курсировал между Нью-Йорком и Албани со средней скоростью 5 миль в час. «Л е в и а ф а н», употреблявшийся правительством САСШ во время мировой войны для перевозки войск, вмещал свыше 10 000 солдат. Его длина — 320 *м*, а ширина — 33 *м*. Максимальное водоизмещение — 65 000 тонн. У него 4 турбины, дающие в общей сложности 66 000 л. с. и двигающие 4 пропеллера. Во время испытания он развил скорость в 25,8 узлов.

можно заключить, что для всех газов при постоянном объеме давление пропорционально абсолютной температуре, т. е.

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

Если поставить опыт так, чтобы давление газа оставалось неизменным, а объем мог меняться с повышением температуры, мы получим коэффициент расширения газа при постоянном давлении, который определяется как отношение увеличения объема при повышении температуры на 1° к общему объему газа при 0°С. Этот опыт впервые был проделан в 1802 г. другим французским ученым, Гей-Люссаком. Он нашел, что все газы обладают одним и тем же коэффициентом расширения при постоянном давлении, равным 1/273. Это положение известно, как закон Гей-Люссака.

Из закона Гей-Люссака следует, что при постоянном давлении для всех газов объем пропорционален абсолютной температуре, т. е.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

Когда меняются и давление, и температура, и объем, имеем:

$$\frac{P_1 V_1}{P_2 V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad ^{1)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

Любую из этих шести величин можно найти, зная 5 остальных.

Если объем остается постоянным, т. е. $V_1 = V_2$, уравнение (4) превращается в (2), т. е. в закон Шарля.

Если давление остается постоянным, т. е. $P_1 = P_2$; уравнение (4) превращается в (3), т. е. в закон Гей-Люссака. Если температура остается неизменной, т. е. $T_1 = T_2$, уравнение (4) сводится к $P_1 V_1 = P_2 V_2$, т. е. к закону Бойля. Чтобы найти отношение плотностей, а не объемов, достаточно в уравнениях (3) и (4) V_1 и V_2 заменить через D_2/D_1.

Резюме. **Закон Шарля. Коэффициент расширения при постоянном объеме одинаков для всех газов и равен 1/273.**

Закон Гей-Люссака. Коэффициент расширения при постоянном давлении одинаков для всех газов и равен 1/273.

---

[1]) Если учащемуся неясен вывод этой формулы, пусть он вспомнит следующее: если двое бегут с одинаковой скоростью, пройденные ими расстояния пропорциональны временам их пробега, т. е.

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{t_1}{t_2};$$

если же они бегут одинаковое время, а скорости их различны, то

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{V_1}{V_2}.$$

Пусть теперь один бежит вдвое скорее и к тому же вдвое дольше другого. Ясно, что он продвинется в 4 раза дальше, т. е. когда меняются и скорости и времена пробега, имеем:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{t_1 S_1}{t_2 S_2}.$$

Вопросы и задачи.

1. Как объясняет кинетическая теория материи давление газа?

2. Почему не рекомендуется оставлять на солнце пневматическую чернильницу (см. рис. 486)?

3. До какой температуры нужно нагреть количество газа, при 0° занимавшее объем в 0,1 *куб. м*, чтобы объем его, при постоянном давлении, удвоился?

4. Объем некоторого количества воздуха при 30° С был 200 *куб. см*. При какой температуре объем его достигнет при постоянном давлении 300 *куб. см*?

5. Воздух в автомобильной шине давит с силой в 4 *кг* на *кв. см* при температуре 10° С. До какой температуры надо нагреть этот воздух, чтобы он давил с силой 4,5 *кг* на *кв. см*, предполагая объем шины неизменным.

6. 15 *куб. см* воздуха подвержены давлению в 76 *см*. Затем при неизменной температуре давление уменьшается до 40 *см*. Как изменяется при этом объем воздуха (см. закон Бойля)? Если затем температура воздуха с 15° поднимается до 100° С, при постоянном давлении, каков будет окончательно его объем?

7. В наполовину надутом воздушном шаре воздух занимает объем в 50 000 *м*. Температура его 15° С, а барометрическое давление равно 75 *см*. Каков будет объем этого воздуха, после того как шар поднимется на высоту Монблана, где давление 37 *см*, а температура 10° С?

8. Можно ли заключить из закона Гей-Люссака, что объем газа при абсолютном нуле равен нулю?

Если нет, объясните, почему?

РАСШИРЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ.

173. Расширение жидкостей. Законы расширения жидкостей значительно отличаются от законов расширения газов:

1. Коэффициенты расширения жидкостей значительно меньше коэффициентов расширения газов.

2. Расширение различных жидкостей происходит совершенно различным образом. Так, напр., при температуре между 0° и 10°С коэффициент расширения спирта равен 0,0011, эфира — 0,0015, керосина — 0,0009, ртути — 0,000181.

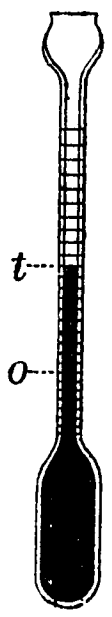


Рис. 154. Прибор для измерения расширения жидкостей.

3. Часто коэффициент расширения одной и той же жидкости меняется в зависимости от температуры. Другими словами, расширение происходит неравномерно. Так, напр., если вычислять коэффициент расширения спирта при температуре между 0° и 60°С, а не между 0° и 10°С, то получится 0,0013, а не 0,0011.

Для ртути, однако, коэффициент расширения для очень большого температурного промежутка очень близок к постоянному. Это можно было предвидеть, зная, что показания ртутных термометров так хорошо совпадают с газовыми термометрами.

174. Измерение коэффициента расширения жидкостей. Один из самых удобных и общепринятых способов измерять коэффициенты расширения жидкостей состоит в следующем. Исследуемую жидкость наливают в колбу, объем которой известен; горлышко колбы сделано в виде капилляра известного диаметра (см. рис. 154). Нагревая жидкость до

известной температуры, следят за повышением ее уровня в капилляре. Приходится, конечно, сделать соответствующую поправку на увеличение объема самой колбы, но сделать это очень легко, зная коэффициент расширения материала колбы.

175. Наибольшая плотность воды. Если в только что описанный прибор (§ 174) налить воды, окажется, что уровень ее в капилляре будет самый низкий при 4°С. При понижении температуры с 4°С до 0°С вода ведет себя очень странно: она р а с ш и р я е т с я при п о н и ж е н и и температуры. Таким образом, оказывается, что в о д а и м е е т н а и б о л ь ш у ю п л о т н о с т ь при 4°С.

176. Замерзание озер зимою. С помощью предыдущего параграфа легко понять, как с приближением зимы происходит остывание воды в глубоких озерах. Первым долгом остывают верхние слои воды. При этом они сжимаются, т. е. делаются тяжелее нижних слоев. Поэтому эти верхние слои опускаются вниз, а на их место снизу поднимается более теплая вода. Этот процесс остывания поверхности и опускания верхних слоев вниз продолжается до тех пор, пока вся вода не достигнет температуры в 4° С. С этого момента дальнейшее остывание верхних слоев делает их л е г ч е нижних, и поэтому они остаются сверху, пока не замерзнут (рис. 155). Таким образом, прежде чем на поверхности озера может появиться лед, вся масса воды в озере до самого дна должна охладиться до 4°С. Вот почему для замерзания глубоких озер требуется гораздо больший срок и более сильные морозы, чем для замерзания мелких водоемов. Так как при 4°С прекращается описанная выше циркуляция воды, то почти вся незамерзшая вода даже в самые лютые морозы имеет температуру 4°С. Только слой воды, находящийся в непосредственной близости от льда, имеет температуру более низкую, чем 4°С.

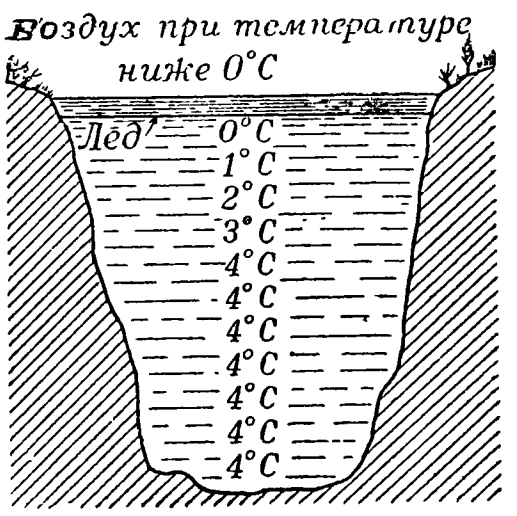


Рис. 155. Замерзание глубокого озера.

Это факт чрезвычайной важности: только благодаря этому в воде и зимою может существовать жизнь.

177. Расширение твердых тел. Доказательства расширения твердых тел при нагревании встречаются на каждом шагу. Железнодорожные рельсы укладывают так, что между их концами остаются зазоры для того, чтобы они во время летней жары могли беспрепятственно расширяться, не задевая друг друга. Другой пример, шины делают меньше колес, для которых они предназначаются. Затем шины нагревают, пока они не расширятся настолько, что можно их надеть на колеса. При остывании они сжимаются и пристают таким образом к колесам с громадной силой.

На лекциях обычно показывают следующий простой опыт.

Пусть шарик B в холодном состоянии только-только проходит сквозь кольцо K. Нагреем шарик на бунзеновской горелке. Он уже не сможет пройти сквозь кольцо. Но если нагреть кольцо или дать шарику охладиться, — он опять будет проходить сквозь кольцо (рис. 156).

Мы уже видели, что расширение газов и жидкостей вызвано приращением средней кинетической энергии движения их молекул. Из всех приведенных примеров на расширение твердых тел ясно, что и для них можно дать аналогичное объяснение.

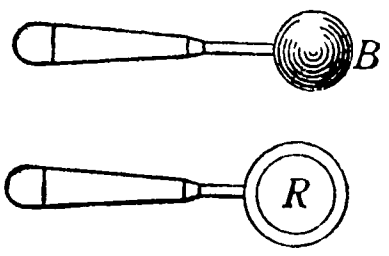


Рис. 156. Расширение твердых тел.

Итак, температура всякого вещества, будь оно твердое, жидкое или газообразное, определяется средней энергией движения его молекул.

178. Линейные коэффициенты расширения твердых тел. Часто бывает удобнее измерять не приращение объема твердого тела, а приращение длины одного его края. Отношение приращения длины при повышении температуры на один градус ко всей длине называется линейным коэффициентом расширения твердого тела. Так, например, если через l_1 обозначим длину стержня при $t_1°$, а через l_2 — его длину при $t_2°$, то коэффициент линейного расширения k можно найти из уравнения:

$$k = \frac{l_2 - l_1}{l_1 (t_2 - t_1)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

Другими словами, изменение длины = коэффициенту линейного расширения × длину × изменение температуры, т. е.

$$l_2 - l_1 = k\, l_1\, (t_2 - t_1) \quad \ldots\ldots\ldots (6)$$

Различие коэффициентов линейного расширения различных веществ можно показать на следующем опыте.

Стержень на рис. 157 состоит из двух скрепленных друг с другом полос: латунной и железной. Будем нагревать ребро стержня бунзеновской горелкой так, чтобы оба металла нагревались одинаково. Стержень изогнется, как на рис. 158; это значит, что сверху

Рис. 157. Рис. 158.
Неравномерное расширение металлов.

находится латунь, расширяющаяся сильнее железа. Опустим затем стержень в снег или лед: он изогнется в противоположном направлении. В следующей табличке приведены коэффициенты линейного расширения некоторых часто встречающихся веществ:

Инвар: сталь (3 10 никеля)	0,0000009	Медь	0,000017
Стекло (пирекс)	0,000003	Латунь	0,000019
Стекло (простое)	0,000009	Серебро	0,000019
Платина	0,000009	Алюминий	0,000023
Железо	0,000012	Свинец	0,000029
Сталь	0,000013	Цинк	0,000029
Никкель	0,000013	Натрий	0,000226

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ.

179. Компенсационное храповое колесо. Храповое колесо хороших часов (рис. 159) является применением неодинакового расширения различных металлов. При повышении температуры увеличивается радиус колеса и уменьшается эластичность пружины, регулирующей его движение. Оба эти явления стремятся замедлить ход часов. Для противодействия этому стремлению надо подвинуть вращающиеся части ближе к центру колеса. Достигается это тем, что дуги *oc* делают из металлов с различными коэффициентами расширения. Внутренний металл (на рисунке — черный) имеет меньший коэффициент расширения. Тогда при повышении температуры свободные концы дуг загибаются внутрь колеса, что и противодействует замедлению хода. Принцип тут точь в-точь такой же, как в простом опыте с двойным стержнем (рис. 157). Обыкновенно в термостате (рис. 160) регулировка температуры производится с помощью сложного стерженя из латуни и стали-инвар. Он устроен так, что при охлаждении открывается тяга путем замыкания электрического тока в *a*, а при нагревании тяга закрывается с помощью контакта *b*.

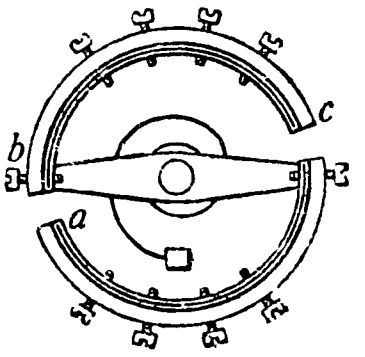


Рис. 159. Храповое колесо часов.

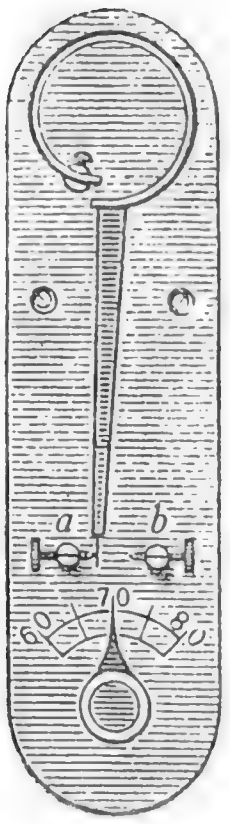


Рис. 160. Термостат.

Резюме. **Коэффициент объемного расширения любого вещества есть отношение приращения объема при повышении температуры на 1 градус к начальному объему (точнее — к объему при 0°).**

Коэффициент литейного расширения твердого тела есть отношение приращения длины при повышении температуры на 1 градус к начальной длине (точнее — к длине при 0°). Различие коэффициентов расширения различных твердых тел находит себе многочисленные применения: при регулировке температуры, при измерениях температуры, при регулировке часов и т. п.

Вопросы и задачи.

1. Почему толстостенный стакан лопнет скорее, чем тонкостенный, если налить в него горячую воду?

2. Почему пирексовое стекло (печное стекло) не лопается при внезапном переносе из печи на холодный стол?

3. Химическая посуда (пробирки, стаканы, тигли) часто изготовляется из чистого кварца. Можно нагревать ее докрасна и опускать в воду, не причиняя ей вреда. Чем это объяснить?

4. Приведите три причины, по которым выгоднее наполнять термометры ртутью, а не водой.

5. Почему иногда удается легче вынуть стеклянную пробку, если нагреть горлышко бутылки?

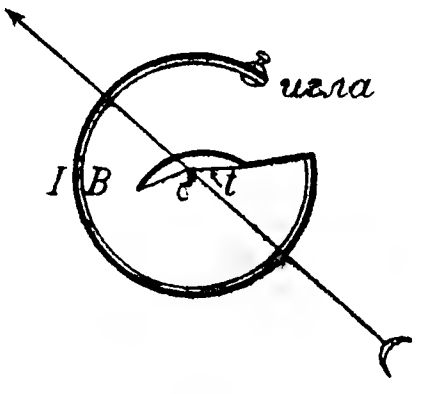


Рис. 161.

6. Термометр с циферблатом является составным стержнем (рис. 161). Снаружи — железо, а внутри — латунь. Вокруг цилиндра *c*, находящегося в центре, навита нить. Объясните действие этого инструмен а.

7. Бруклинский мост висит на стальном троссе длиной свыше одного километра. В каких пределах колеблется 1 *км* длины этого тросса при изменении температуры от — 20° С (зимний день) до + 30° С (летний день)?

8. Длинные трубы парового отопления подвержены большим колебаниям температуры. Поэтому явилась необходимость делать специальные «расширительные швы». Эти швы состоят из латунных скобок, плотно обхватывающих концы двух соседних труб. Положим, что трубы — железные, а такого рода швы имеются через каждые 70 *м*, а температура колеблется от 30° С до 125° С. Какой наименьший зазор должен быть допущен в каждом таком шве?

9. Если длина проволоки 250 *м* при 0° С и 250,305 *м* при 40° С, то каков коэффициент расширения проволоки?

ГЛАВА IX.

РАБОТА И ТЕПЛОВАЯ ЭНЕРГИЯ.

МЕХАНИЧЕСКИЙ ЭКВИВАЛЕНТ ТЕПЛА.

180. Во что превращается потерянная работа? Мы видели, что во всех рассмотренных нами механизмах, служащих для передачи работы, некоторый процент приложенной работы теряется из-за трения. Сразу же, естественно, является вопрос: куда же девается эта потерянная работа? Ответ можно получить из рассмотрения некоторых простых фактов. Если сильно потереть друг о друга два стержня, они нагреются. Сверла и буравы часто нагреваются так, что невозможно держать их в руках. Спички зажигаются посредством трения. Если несколько раз ударить молотком по свинцовой пластинке, она заметно нагреется.

В главе VIII было указано, что, согласно современным воззрениям, повышение температуры тела — это просто увеличение средней скорости его молекул, другими словами, увеличение средней кинетической энергии молекул тела. С этой точки зрения, все только что перечисленные факты заставляют нас заключить, что во всех этих случаях затраченная механическая энергия просто превратилась в энергию движения молекул. Такой взгляд впервые был высказан в 1798 г. Веньямином Томсоном графом Румфордом, американцем по месту рождения.

На такое воззрение Румфорда натолкнуло его наблюдение, что при прохождении ядра через дуло пушки развивается тепло. Эта точка зрения была впервые тщательно проверена английским физиком Джемсом Джоулем (1818—1889) в течение периода 1842—1870 гг. на целом ряде опытов, создавших эпоху в истории физики.

Для понимания этих опытов нам прежде всего надо познакомиться с измерением количеств теплоты.

181. Единица теплоты. Калорией называется количество теплоты, потребное для повышения 1 *г* воды на 1° С. Таким образом, если температура 100 *г* воды была повышена на 4° С, говорят, что вода поглотила 400 калорий тепла. Точно так же, если 100 *г* воды охладились на 10° С, говорят, что вода потеряла 1 000 калорий.

Как же можно измерить количество теплоты, развивающееся, например, при ударе свинцовой пули о мишень? Для этого достаточно дать ударившейся пуле упасть в точно измеренное весовое количество воды, а затем измерить количество градусов, на которое повы-

силась температура воды. Произведение числа граммов воды на ее повышение температуры дает, по определению, число калорий теплоты, поглощенных водой.

Заметим, что в данном нами определении не содержится никаких предположений о том, что такое теплота? До XIX века физики, обыкновенно, думали, что теплота является невидимой, невесомой жидкостью (флюидом), причем проникновение ее в тело или выход из тела вызывает повышение или, соответственно, понижение температуры тела. Эта точка зрения довольно хорошо объясняет нагревание тела при соприкосновении с пламенем или с другим нагретым телом. Но она не в состоянии объяснить нагревание при трении или ударе. Точка зрения Румфорда, как мы уже видели, отлично объясняет это, и, кроме того, она не менее удовлетворительно объясняет нагревание холодных тел при соприкосновении с телами нагретыми. Действительно, для этого достаточно предположить, что более нагретые, а, следовательно, обладающие большей энергией молекулы горячего тела сообщают свою энергию молекулам холодного тела, примерно так, как быстро движущийся бильярдный шар при столкновении с движущимся более медленно отдает ему часть своей кинетической энергии.

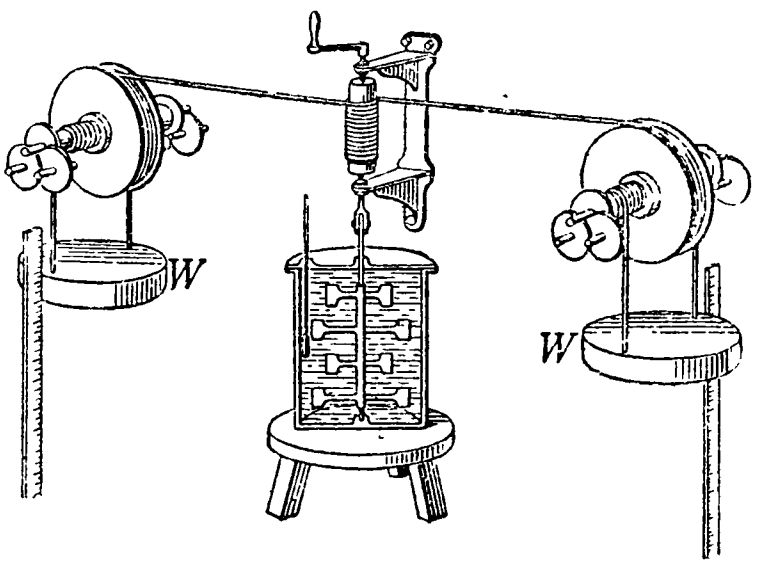


Рис. 162. Первый опыт Джоуля.

182. Опыт Джоуля с теплотой, развивающейся при трении. Джоуль рассуждал так: если теплота, развивающаяся при трении и т. п. явлениях, действительно есть только механическая энергия, сообщенная молекулам нагретого тела, тогда при исчезании некоторого определенного количества механической энергии всегда должно появляться то же самое количество калорий. И это количество калорий не должно зависеть от того, затрачена ли работа на преодоление трения дерева по дереву или железа по железу, произведен ли удар, сжатие или какая-либо иная работа.

Для проверки этого рассуждения Джоуль заставлял механическую энергию исчезать самыми различными способами и во всех случаях измерял количество появившегося тепла.

В первом опыте Джоуля в сосуде с водой с помощью падающих грузов W вращалась мешалка (рис. 162). Работа силы тяжести, заставлявшая грузы опускаться, равнялась произведению их веса W на пройденный ими путь d. При медленном и равномерном опускании грузов, вся эта работа затрачивалась на преодоление сопротивления воды движению мешалки. Другими словами, работа эта затрачивалась на создание вихревых потоков воды. Джоуль измерял повышение температуры воды. Он получил, что для развития тепла, потребного для повышения температуры 1 *г* воды на один градус, необходимо затратить 427 *г-м* работы. Это число — среднее из результатов трех его лучших опытов. Это число было проверено и современными опытами и в настоящее время принято повсюду.

Затем Джоуль повторил опыт, заменив воду ртутью, и получил, что для получения 1 калории теплоты необходимо затратить 425 *г-м* работы. Разность этих двух результатов оказалась меньше, чем можно было ожидать

вследствие неизбежных погрешностей опыта. Далее Джоуль еще раз повторил опыт, причем тепло получалось уже от трения железа по железу, и опять получил 425.

183. Теплота, развивающаяся при столкновении. Француз Гирн первый тщательно исследовал соотношение между теплотой, развивающейся при столкновении, и исчезающей при этом кинетической энергией. В его опыте стальной цилиндр падал с некоторой известной высоты и при столкновении сплющивал свинцовый шар. Для измерения количества теплоты, появившейся в свинце, шар быстро опускался в небольшое количество воды, а затем измерялось повышение температуры воды. Среднее из большого количества наблюдений опять дало 425 *г-м* затраченной энергии на каждую появившуюся калорию.

184. Теплота, появляющаяся при сжатии газа. Далее Джоуль измерял соотношение между теплотой и работой еще одним способом. Он сжимал газ и измерял количество развившейся теплоты. Каждый велосипедист прекрасно знает, что при надувании шин насос нагревается. Это отчасти вызвано трением поршня о стенки, но главная причина — это то, что при опускании поршня движение его передается молекулам, соприкасающимся с ним, так что скорость их увеличивается.

Рис. 163. Огнепный шприц.

Чтобы представить себе яснее, что здесь происходит, вспомним, как ударом палки можно сообщить скорость мячу. Если палка закреплена неподвижно и мяч ударяется об нее, он отскакивает с некоторой скоростью; если же палка быстро движется навстречу мячу, мяч отскакивает с гораздо большей скоростью. Точно так же и молекулы, сталкиваясь при своем нормальном движении с движущимся им навстречу поршнем, отскакивают от него с большей скоростью, чем отскочили бы от неподвижной стены. Это увеличение молекулярной скорости сжимаемого газа так велико, что, когда масса газа при 0° С сжата до половины своего объема, температура его повышается до 87° С.

Это явление можно замечательно иллюстрировать с помощью «огненного шприца» (рис. 163). Капнем несколько капель сероуглерода на маленький кусочек шерсти и бросим его на дно трубки *A*, а затем уберем оттуда. Затем введем поршень *B* и опустим его внезапным резким толчком. При этом разовьется тепло, достаточное для воспламенения паров, и получится вспышка. (Если при первом опускании поршня вспышки не получится, следует совсем вынуть поршень, затем снова вставить его и опять резко опустить.)

Для измерения теплоты при сжатии Джоуль окружил маленький нагнетательный насос водой, заставил насос сделать 300 оборотов и затем измерил повышение температуры воды. Из этих измерений он получил для механического эквивалента калории значение *444 г-м*.

Но опыты эти не могли быть поставлены с большой точностью.

Джоуль измерял также и обратное явление: охлаждение газа, толкающего поршень вперед, т. е. совершающего работу. В этом случае он получил 437 *г-м*.

185. Значение опытов Джоуля. Джоуль произвел еще три других исследования соотношения между теплотой и работой; при этом он пользовался методом, требующим электрических измерений. Как среднее из всех его наблюдений он опубликовал значение механического эквивалента калории равным 426,4 *г-м*. Однако главное значение его опытов не в точности результата, а в том, что они впервые доказали, что при потере определенного количества работы каким бы то ни было путем всегда появляется одно и то же количество теплоты.

Самое тщательное измерение механического эквивалента тепла было произведено Роулэндом (1848 — 1901) в 1880 г. Он получил значение 427 *г-м* (4,19 × 10^6 эргов).

Мы обычно будем принимать его равным 42 000 000 эргам.

186. Сохранение энергии. Теперь мы можем формулировать закон всех машин в самой общей форме, т. е. так, чтобы он охватывал даже и те случаи, когда существует трение.

Он гласит так: работа, произведенная действующей силой, равна сумме появившейся кинетической и потенциальной энергии плюс механический эквивалент развившегося тепла.

Другими словами: если к какой-нибудь машине или любому механизму приложено некоторое количество работы, то точно такое же количество работы всегда появляется или в виде полезной работы, или в виде тепла.

Полезная работа может проявиться или в виде потенциальной энергии приподнятой массы, например, когда вода накачивается в резервуар; или в виде кинетической энергии движущейся массы, например, когда камень вылетает из пращи; или в виде потенциальной энергии молекул, когда изменилось их взаимное расположение, например, в сжатой пружине; или в виде потенциальной молекулярной энергии атомов, разъединенных химически, как при разложении сложного вещества электрическим током.

Потерянная работа всегда проявляется в виде увеличения скорости движения молекул, т. е. в виде тепла. Это важное обобщение получило название принципа сохранения энергии. Можно формулировать его таким образом: энергию можно преобразовать, но никогда нельзя создать или уничтожить ее.

187. Перпетуум мобиле. С древнейших времен и до наших дней всегда существовали люди, стремящиеся изобрести машину, из которой можно было бы непрерывно получать работу, не затрачивая на эту машину эквивалентного количества работы, другими словами — перпетуум мобиле.

Принцип сохранения энергии говорит об абсолютной невозможности создать такой механизм. Ибо только, когда не развивается теплота, т. е., при отсутствии трения, работа, полученная из машины, может быть равна работе, приложенной к машине, но

ни в каком случае она не может быть б о л ь ш е приложенной работы. Но так как в действительности всегда существует некоторая потеря на трение, то в принципе сохранения энергии кроется утверждение: невозможно создать машину, могущую действовать вечно, даже если она не производит при этом никакой полезной работы. Ибо, независимо от того, сколько кинетической или потенциальной энергии приложено к машине вначале, чтобы пустить ее в ход, эта энергия все время непрерывно расходуется на преодоление трения. И как только потерянная работа сделается равной начальной энергии, машина остановится.

В настоящее время принцип сохранения энергии получил всеобщее признание и является краеугольным камнем физических наук. Однако, недавно Эйнштейн высказал мысль, что энергия и материя могут переходить друг в друга, и целый ряд соображений говорит в пользу такого взгляда.

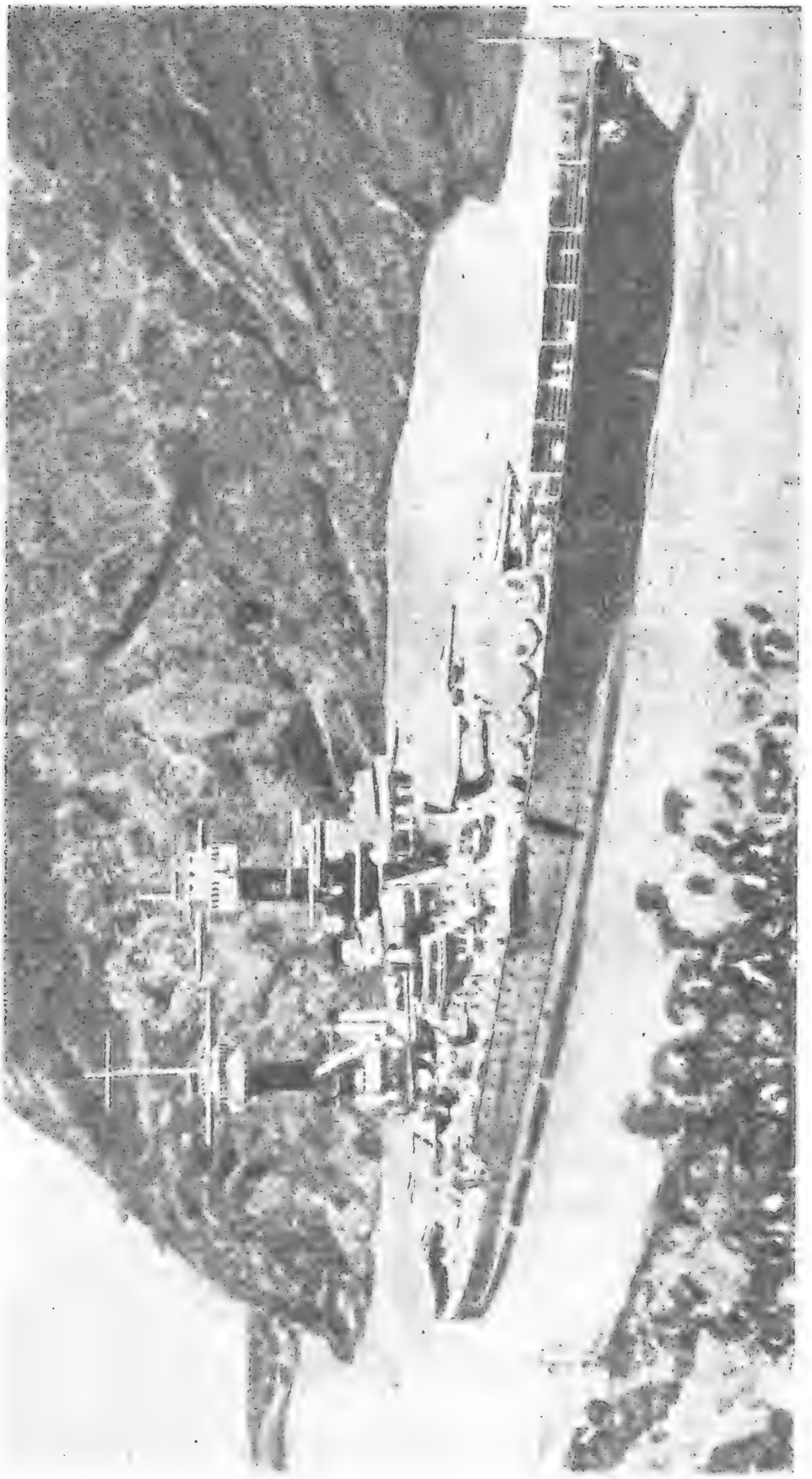
188. Превращения энергии на гидростанциях. Во всех гидростанциях, как, напр., Ниагарская станция, происходят следующие превращения энергии: прежде всего, над плотиной энергия существует в виде потенциальной энергии воды. Эта энергия в турбинах превращается в кинетическую энергию вращающихся колес. Турбины приводят в движение динамомашины, в которых энергия превращается в электрическую энергию. Электрическая энергия передается по проводам до города Сиракуз, отстоящего от Ниагарской станции на 150 миль, и там она приводит в движение моторы, служащие двигателями трамвая и т. п. Из принципа сохранения энергии следует, что работа силы тяжести, заставившая воду упасть сверху на турбины, в точности равна работе, совершенной всеми двигателями, плюс тепло, развившееся во всех проводах и передачах и в вихревых течениях в воде.

Посмотрим теперь, откуда вода получила свою начальную потенциальную энергию. Под влиянием солнечного тепла вода все время испаряется с поверхности океана. Это происходит потому, что солнечное тепло сообщает молекулам воды достаточно кинетической энергии, чтобы они могли оторваться от притяжения соседних молекул и подняться с поверхности воды в виде пара. Поднявшийся пар захватывается ветрами, проносится ими над материками и падает обратно на землю в виде дождя или снега. Таким образом, потенциальная энергия воды в Ниагаре — это просто превращенная энергия солнечного тепла. Если разобрать таким же образом различные виды энергии, находящиеся в распоряжении человека, почти во всех случаях источником энергии окажется солнечное тепло. Так, напр., энергия, содержащаяся в угле, есть просто-напросто энергия разъединения кислорода и углерода. Это разъединение происходило подъ действием лучей солнца. Земля непрерывно получает от солнца поток энергии в 342 000 000 000 000 лошадиных сил, т. е., на каждого живущего на земле приходится 1/5 миллиона лошадиных сил. Мы можем составить себе некоторое понятие о гигантском запасе энергии, излучаемом солнцем в пространство в виде тепла, если вспомним, что на землю приходится не более $\frac{1}{2\,000\,000\,000}$ всего излучения. Из полученной землею энергией не более $\frac{1}{1\,000}$ идет на поддержание животной и растительной жизни и на испарение воды. Практически эта небольшая часть солнечной энергии и составляет весь запас энергии на земле, и только эту энергию человек может употреблять для удовлетворения своих нужд.

Резюме. **Джоуль опытным путем доказал, что существует механический эквивалент теплоты, т. е. что при превращении некоторого определенного количества работы в теплоту всегда получается одно определенное**

количество теплоты, независимо от того, каким путем это превращение произошло.

Механический эквивалент 1 калории = 427 *г-м* (= 42 000 000 эргов). Общий закон всех машин, в которых существует трение. Работа, совершенная действующей силой, равна сумме появившихся



ДРЕДНОУТ САСШ ПРОХОДИТ ЧЕРЕЗ ПАНАМСКИЙ КАНАЛ.

Сверхдредноут типа «Мэрилэнд», самый большой из всех существующих, имеет водоизмещение свыше 33 600 тонн и мощность свыше 33 000 л. с., и развивает скорость около 21 узла. На нем 8 16-дюймовых орудий, могущих обстрелять 2 040-фунтовыми снарядами врагжеские суда, находящиеся на расстоянии 15—20 миль. Каждый выстрел из 16-дюймового орудия обладает энергией эквивалентной 33 000 метр.-тонн. Пронижающая способность этих новых 16-дюймовых орудий равна 80 *см* самой твердой брони.

потенциальной и кинетической энергий, плюс механический эквивалент развившегося тепла. Или, иначе: при всякой затрате энергии на машину, или, вообще, любой механизм, точно то же количество энергии появляется или в виде полезной работы, или в виде теплоты.

Вопросы и задачи.

1. Мяч, весящий 45 *г*, упал с высоты 200 *см* и подскочил на 150 *см*. Сколько *г-см* механической энергии исчезло? В какой вид энергии она превратилась и где эта энергия сосредоточена?

2. Объясните, почему нельзя было открыть закон сохранения энергии до того, как были выработаны методы измерения тепла?

3. $2^1/_2$ литра воды нагреты с 10° С до 68° С. Если бы можно было всю тепловую энергию этой воды превратить в полезную работу, то на какую высоту можно было бы поднять 10 *г* угля?

4. Объясните, почему цилиндр автомобильного насоса нагревается при употреблении? Почему воздух, выходящий из автомобильной шины, оказывается охлажденным?

5. Докажите, что, согласно закона сохранения энергии, газ при расширении должен охлаждаться.

ТЕПЛОЕМКОСТЬ.

189. Определение темплоемкости. Экспериментируя с различными веществами, мы убеждаемся, что для изменения температуры 1 *г* различных веществ на 1°, нужны весьма различные количества тепловой энергии.

Поместим в одну пробирку 100 *г* свинцовой дроби, в другую — 100 *г* кусочков железной проволоки, в третью — 100 *г* кусочков алюминиевой проволоки. Затем все три пробирки на 10 или 15 минут поместим в сосуд с кипящей водой, следя за тем, чтобы ни в одну пробирку не попала вода. Затем достанем 3 небольших сосуда и в каждый нальем по 100 *г* воды при комнатной температуре. В первый сосуд бросим нагретую дробь и после основательного перемешивания заметим повышение температуры воды. То же самое сделаем и с другими металлами. Окажется, что алюминий повысит температуру воды вдвое больше, чем железо, а железо, примерно, в три раза больше, чем свинец. Между тем все три металла охладились, приблизительно, на одинаковое число градусов. Это значит, что при охлаждении на 1° С 1 *г* алюминия отдает, примерно, в шесть раз больше калорий, чем 1 *г* свинца.

Теплоемкостью данного вещества называется количество калорий, которое 1 *г* этого вещества поглощает при повышении температуры на 1° С, или отдает, при понижении температуры на 1° С.

190. Определение теплоемкости по способу смешения. Предыдущий опыт позволяет найти метод для точного определения теплоемкостей различных веществ. Ибо, согласно принципу сохранения энергии, при соприкосновении горячих и холодных тел, как в этих опытах, и передаче тепла от горячего тела холодному, приращение тепловой энергии одного тела должно быть в точности равно уменьшению тепловой энергии другого.

Это самый распространенный способ определения теплоемкости различных веществ. Он известен как способ смешения.

Предположим, что начальная температура дроби в опыте § 189 была 95° С, а воды — 19,7°, и что после погружения дроби в воду их температура была 22°. Значит, 100 *г* воды нагрелись на 22° — — 19,7° = 2,3°, т. е. вода поглотила 230 калорий тепла. Температура дроби опустилась на 95° — 22° = 73°; значит, при остывании на 1° 100 *г* дроби отдали $\frac{230}{73} = 3{,}15$ калорий.

Отсюда теплоемкость свинца, т. е. количество

калорий, теряемых 1 *г* свинца при остывании на 1° С, равно 3,15 : 100 = 0,0315.

Эту же задачу можно решить алгебраически следующим образом: обозначим теплоемкость свинца через x, тогда число калорий, покидающих дробь, равно произведению массы дроби на ее теплоемкость и на изменение ее температуры, т. е. равно $100x \times x$ (95—22); то же самое число калорий поглощается водой, и выражается оно так: $100 \times 1 \times (22 - 19{,}7)$. Отсюда имеем:

$100\ (95 - 22)\ x = 100\ (22 - 19{,}7)$, т. е. $x = 0{,}0315$.

В следующей таблице приведены теплоемкости некоторых веществ, найденные по этому же способу.

ТАБЛИЦА ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ.

Свинец . .	0,0315	Железо	0,113
Золото	0,0316	Стекло	0,2
Платина	0,032	Земля, камень, песок приблиз. .	0,2
Ртуть	0,0333	Алюминий	0,218
Серебро	0,0568	Лед	0,504
Латунь	0,094		
Медь	0,095		

Резюме. **Теплоемкостью вещества называется число калорий, поглощенное 1 *г* вещества при повышении его температуры на 1° С. Число единиц теплоты, поглощенных или испущенных телом, равно произведению его массы на изменение температуры на теплоемкость.**

Темплоемкость определяют по способу смешения; для этого приравнивают тепло, потерянное охладившимся телом, теплу, поглощенному нагревшимся телом.

Вопросы и задачи.

1. Почему литр горячей воды является лучшей грелкой, чем такое же весовое количество любого другого вещества, приведенного в предыдущей таблице?

2. Теплоемкость воды гораздо больше, чем теплоемкость любой другой жидкости или любого твердого тела. Объясните, почему вследствие этого на острове, посреди океана, колебания температуры менее резки, чем в континентальных областях.

3. Если в сугроб снега вылить боченок теплой воды, то растает гораздо больше снега, чем если вылить туда чашку кипятка. Где заключено больше теплоты — в боченке или в чашке?

4. Если свинцовая и стальная пуля ударяются с одинаковой силой о мишень, то которая из них больше нагревается?

5. Сколько надо калорий, чтобы нагреть кусок железа весом в 3 *кг*, с 20° С до 130° С?

6. Если 100 *г* ртути при температуре 95° С смешать с 100 *г* воды при 15° С, то температура смеси будет 17,6° С. Определите теплоемкость ртути.

7. Какова будет температура смеси, если смешать 200 *г* воды при 80° С со 100 *г* воды при 10° С? (Обозначим температуру смеси через x. Тогда холодная вода получает $100\ (x - 10)$ калорий, а горячая теряет $200\ (80 - x)$ калорий).

8. Какова будет температура смеси, если 400 *г* алюминия при 100° С поместить в 500 *г* воды при 20° С?

9. Кусок платины, весящий 10 *г*, вынут из печи и моментально опущен в 40 *г* воды при 10° С. Температура воды поднимается на 24° С. Какова была температура печи?

ГЛАВА X.

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ.

ПЛАВЛЕНИЕ.

191. Теплота плавления. Если в холодный зимний день, когда на улице температура ниже 0°С, внести в комнату некоторое количество снега и поместить его над источником тепла, то термометр, опущенный в снег, будет медленно подниматься, пока не дойдет до 0°С. На этой температуре термометр остановится и не поднимется дальше, пока весь снег не растает. При этом следует беспрестанно основательно перемешивать содержимое сосуда. Как только весь снег растает, температура опять начнет повышаться.

Так как температура льда при 0°С та же, что и температура воды при 0°С, очевидно, то что в нашем опыте тепло, входящее в тающий лед, не меняет средней кинетической энергии его молекул. Следовательно, эта тепловая энергия вся затрачивается на отдаление друг от друга молекул ледяных кристаллов: при этом лед переходит в новое состояние, в котором молекулы менее тесно связаны между собой, т. е. в жидкое состояние. Другими словами, энергия, заключавшаяся в пламени в виде кинетической энергии молекулярных движений, перешла в тающее тело и превратилась в нем в потенциальную энергию молекул, удаленных друг от друга, вопреки их взаимному притяжению. Число калорий теплоты, потребное, чтобы расплавить 1 *г* вещества, не меняя его температуры, называется теплотой плавления данного вещества.

192. Численное значение теплоты плавления льда. Имея одно и то же пламя, приходится нагревать некоторое количество снега, пока все оно не растает, в 80 раз дольше, чем надо нагревать уже растаявший снег, чтобы повысить его температуру на 1° С. Отсюда мы заключаем, что для таяния 1 *г* снега или льда нужно затратить около 80 калорий теплоты.

Однако, эту величину можно определить гораздо точнее по методу смешения. Положим, напр., что кусок льда весом в 131 *г* опущен в 500 *г* воды при 40°С, и положим, что, когда весь лед растаял, температура смеси оказывается равной 15°С. Число калорий, потерянных водой, равно $500 \times (40 - 15) = 12\,500$. Но $131 \times 15 = 1\,965$ калорий из этого тепла должно было пойти на повышение температуры воды, получившейся от таяния льда, с 0°С до 15°С. Остальное тепло, а именно $12\,500 - 1965 = 10\,535$ калорий, должно было пойти на таяние 131 *г* льда. Значит, число калорий, потребных для таяния 1 *г* льда, равно $\frac{10535}{131} = 80{,}4$.

Можно решить задачу алгебраически. Пусть x — теплота плавления льда. Тогда имеем

$$131x + 1965 = 12\,500, \text{ т. е. } x = 80{,}4$$

Согласно самым точным определениям теплота плавления льда есть 80 калорий.

193. Превращение энергии при плавлении. Тепловая энергия, поглощаемая телом при переходе из твердого состояния в жидкое, уже не существует в жидкости в виде тепла. Эта энергия вообще прекратила свое существование как тепловая энергия. Она превратилась в молекулярную потенциальную энергию. Другими словами, исчезнувшее тепло представляет собой работу, произведенную для изменения состояния тела. Поэтому эта энергия в точности эквивалентна потенциальной энергии, приобретенной молекулами тела при новом их распределении. Это вполне соответствует закону сохранения энергии.

194. Тепло, отдаваемое водой при замерзании. Нальем в стакан воду, и будем прибавлять к ней снегу и соли, пока температура смеси не станет равной — 10° С или — 12° С. В этот холодный раствор опустим пробирку, содержащую термометр и некоторое количество чистой воды. Если держать термометр совершенно неподвижно, температура воды в пробирке опустится до четырех, пяти или даже десяти градусов ниже 0° С, причем вода не перейдет в твердое состояние. Но стоит только дать термометру малейший толчок или бросить в пробирку маленький кристалл льда, как сразу же начнется образование кристаллов льда, и в то же время температура повысится до 0° С и останется таковой, пока не замерзнет вся вода.

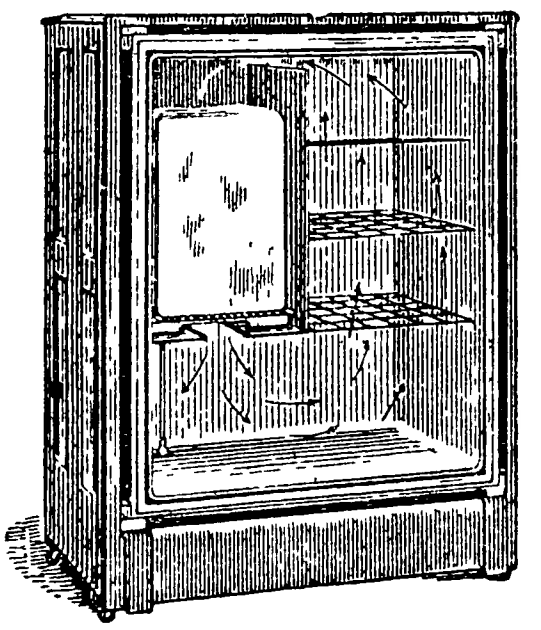


Рис. 164. Холодильник.

Этот опыт чрезвычайно наглядно показывает, что во время процесса замерзания выделяется тепло. Этого и следовало ожидать согласно принципу сохранения энергии. Действительно: раз для превращения 1 *г* льда при 0°С в воду при 0°С приходится затрачивать 80 калорий тепловой энергии, то, очевидно, при обратном превращении воды в лед должно освободиться это же количество энергии.

195. Использование превращений энергии, имеющих место при плавлении и замерзании. Холодильник (рис. 164) представляет собой ящик с двойными стенками, затрудняющими доступ тепла снаружи. Лед находится в одном из отделений верхней части ящика. Благодаря этому воздух наверху охлаждается, делается при этом более плотным и опускается вниз. Т. е. получается циркуляция воздуха, указанная на рис. 164 стрелками. На каждый грамм растаявшего льда тратится 80 калорий тепла, которые отнимаются от воздуха и пищевых продуктов, находящихся в холодильнике.

Тепло, отдаваемое при замерзании воды, тоже часто находит себе практическое применение. Так, напр., в кладовые, где держат овощи, часто помещают сосуды с водой, чтобы предохранить овощи от замерзания. Дело тут в том, что овощи замерзают при температуре несколько ниже 0°С. Поэтому, когда температура в кладовой опускается, вода замерзает раньше овощей, но при этом она выделяет достаточно тепла, чтобы предохранить овощи от промерзания.

Отчасти благодаря теплу, выделяемому водой при замерзании,

температура в окрестностях больших озер никогда не падает так низко, как в местностях, расположенных вдали от воды.

196. Точка плавления кристаллических веществ. Если на мгновение опустить кусок льда в кипящую воду, а затем вынуть его и обтереть, он будет нисколько не теплее какого угодно другого куска льда, не подвергавшегося воздействию тепловой энергии горячей воды. Следовательно, точка плавления льда — это некоторая вполне определенная температура, выше которой лед даже при очень быстром нагревании не может быть нагрет, не перестав быть льдом. Оказывается, все кристаллические вещества ведут себя в этом отношении точно так же, как лед. Каждое такое вещество имеет свою характерную для него точку плавления. В следующей таблице приведены точки плавления некоторых наиболее распространенных веществ:

Газолин	— 145°C	Алюминий . .	650°C
Ртуть	— 39°C	Медь	1100°C
Лед	0°C	Чугун	1200°C
Парафин	54°C	Платина	1775°C
Сера	114°C	Иридий	1950°C
Свинец	330°C	Вольфрам . . .	3390°C

Результаты всех наших наблюдений над точками плавления кристаллических веществ можно резюмировать в следующих двух законах:

1. Температура плавления равна температуре отвердевания.

2. Температура плавящегося или отвердевающегося вещества остается постоянной с момента начала процесса плавления или отвердевания и до полного его завершения.

197. Плавление некристаллических, т. е. аморфных веществ. Поместим конец стеклянной палочки в пламя бунзеновской горелки. Вместо внезапного перехода из твердого состояния в жидкое, стекло постепенно будет размягчаться все более и более, и наконец, если палочка не слишком толстая и пламя достаточно горячее, с палочки упадет капля расплавленного стекла.

Если бы мы измеряли температуру палочки во время этого процесса, мы увидели бы, что она все время непрерывно поднималась. Такого рода поведение, совершенно непохожее на поведение кристаллических веществ, характерно для вара, воска, смолы, клея, гутаперчи, и, вообще, для всех аморфных веществ. У таких веществ нет никаких определенных точек плавления; они и при плавлении, и при отвердевании проходят через все степени вязкости. Только благодаря этому свойству стекло и подобные ему вещества можно разогревать до мягкого состояния и придавать им любую форму.

198. Изменение объема при отвердевании. Лед плавает на воде. Бутылка с водой трескается, когда вода внутри нее замерзает. Отсюда нетрудно понять, что вода расширяется при замерзании. Действительно, 1 *куб. см* воды превращается в 1,09 *куб. см* льда, т. е. он при замерзании расширяется больше чем на $^1/_{12}$ начального объема. Это сначала может показаться странным: ведь очевидно, в твердом теле молекулы теснее связаны друг с другом, чем в жидкости. Однако всякое недоумение исчезнет, если вспомнить, что при замерзании воды молекулы ее группируются в кристаллы, причем,

повидимому, между отдельными кристаллами остаются сравнительно большие свободные пространства. Таким образом, хотя группы отдельных молекул связаны теснее, чем в жидкости, все же вся совокупность молекул занимает объем больший, чем прежде.

В противоположность льду, огромное большинство кристаллических веществ сжимается при отвердевании и расширяется при плавлении. Исключениями являются вода, сурьма, висмут, чугун и некоторые сплавы, содержащие сурьму или висмут. Хорошим материалом для отливки служат только вещества, расширяющиеся или очень мало меняющиеся в объеме при отвердевании. Это ясно. Ведь сжимающиеся при отвердевании вещества не примут форму шаблона. Поэтому золотые и серебряные монеты приходится не отливать, а штамповать. Отливать шрифты можно только из металлов, расширяющихся при отвердевании: это совершенно очевидно, так как хороший шрифт должен иметь очень четкие, резкие контуры. Обыкновенно для литья шрифтов употребляют сплав свинца, сурьмы и меди, удовлетворяющий поставленному требованию.

199. Расширение воды при замерзании. Если бы вода не расширялась при замерзании, — в отличие от большей части других веществ, — то почти все, а может быть и просто все существующие ныне формы жизни на земле были бы невозможны. Дело в том, что зимою лед опускался бы, по мере замерзания, на дно прудов и озер, и очень скоро наши реки, озера, а может-быть и океаны, превратились бы в сплошной твердый лед. При расширении замерзающая вода производит очень большое давление.

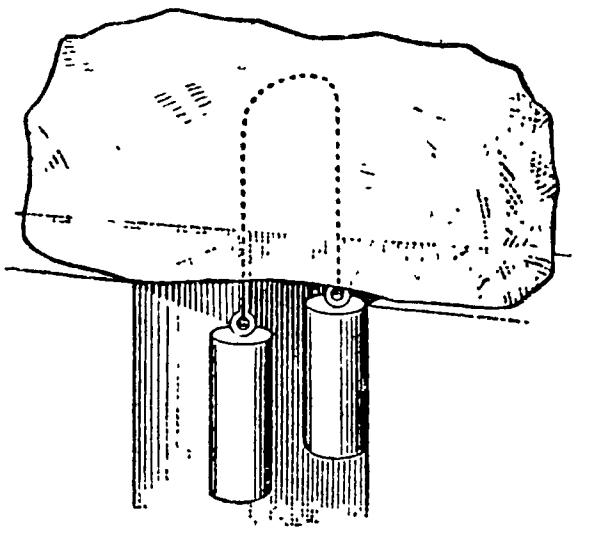


Рис. 165.

Стальные бомбы, наполненные водой, разрываются, если оставить их на морозе. Одна из главных причин разрушения горных пород — замерзание и соответствующее расширение воды, попавшей в трещины.

200. Давление понижает точку плавления веществ, расширяющихся при отвердевании. Внешнее давление, действующее на поверхность какого-нибудь тела, препятствует его расширению. Поэтому можно ожидать, что увеличение давления должно мешать отвердеванию тел, которые при этом расширяются. Таким образом, замерзание воды под давлением в 2 атмосферы должно происходить при более низкой температуре, чем при давлении в одну атмосферу.

Тщательные опыты подтвердили правильность этого заключения. Они показали, что при увеличении внешнего давления на 1 атмосферу точка плавления льда понижается на 0,075°С. Несмотря на малость этой величины, существование ее может быть доказано следующим образом.

На проволоке, перекинутой через кусок льда, подвесим 2 груза весом от 5 до 10 *кг* (см. рис. 165). Примерно через полчаса или даже раньше проволока окажется врезавшейся в лед, причем, однако, кусок льда будет совершенно целый. Объясняется это следующим образом: непосредственно под проволокой лед

тает вследствие большого давления. Проволока проходит через образовавшийся слой воды, а вода, находящаяся теперь над проволокой, освобождаясь от давления, немедленно замерзает и восстанавливает целостность куска льда.

Геологи думают, что непрерывное течение ледников отчасти вызвано тем, что лед тает в тех местах, где давление велико, а образовавшаяся вода замерзает немедленно после прекращения давления.

Точка плавления веществ, расширяющихся при отвердевании, понижается при увеличении давления. Точка плавления веществ, сжимающихся при отвердевании, повышается при увеличении давления.

Резюме. **Теплотой плавления вещества называется число калорий тепловой энергии, потребное для того, чтобы расплавить 1 *г* вещества, не меняя его температуры. 1 льда поглощает при таянии 80 калорий. 1 *г* воды выделяет при замерзании 80 калорий. Давление понижает точку плавления веществ, расширяющихся при отвердевании, и повышает точку плавления веществ, сжимающихся при отвердевании.**

Вопросы и задачи.

1. В электрических лампах накаливания употребляется вольфрамовая проволока. Какова точка плавления вольфрама по шкале Фаренгейта?
2. Объясните, почему присутствие льда охлаждает внутренность холодильника?
3. Что является лучшим охладителем: 50 *кг* льда при 0° С или 50 *кг* воды при той же температуре? Почему?
4. Что значит утверждение, что теплота плавления ртути равна 2,8?
5. При смешении одинаковых количеств горячей воды и льда получилась вода при 0° С. Какова была температура горячей воды.
6. Во сколько раз больше нужно тепла, чтобы расплавить кусок льда, чем чтобы нагреть получившуюся воду на 1° С? 1° F? Куда девалась энергия, затраченная на превращение льда при 0° С в воду при 0° С?
7. В течение 1 часа в закрытом холодильнике растаяло 2 *кг* льда. Сколько калорий прошло в течение этого часа через стенки холодильника?
8. Латунный калориметр (теплоемкость латуни = 0,1), весящий 100 *г*, содержал 200 *г* воды при 45° С. В этой воде было расплавлено 100 *г* льда, причем температура смеси оказалась равной 5° С. Вычислите из этих данных теплоту плавления льда.
9. Железная гиря, весящая 200 *г*, была нагрета до температуры 100° С, а затем помещена в дырку, просверленную в куске льда, температура которого 0° С. Когда температура гири сравнялась с температурой льда, оказалось, что растаяло 27.5 *г* льда. Вычислите теплоемкость железа.
10. Почему удается делать снежки, когда снег тает, и не удается, когда его температура на много ниже 0° С?

ИСПАРЕНИЕ И СВОЙСТВА ПАРОВ.

201. Испарение и температура. Кинетическая теория говорит, что повышение температуры есть просто увеличение средней скорости молекулярных движений. Если это действительно так, тогда при повышении температуры должно увеличиваться число молекул, скорость которых достаточно велика, чтобы молекулы эти могли вырваться с поверхности жидкости. Другими словами, при высокой

температуре испарение должно происходить быстрее, чем при низкой. Целый ряд простых наблюдений показывает, что это, действительно, так и происходит. Например. Сырое белье высыхает только при глажении достаточно горячим утюгом. Тротуары на солнечной стороне высыхают скорее, чем на теневой. Если надо быстро просушить какую-нибудь мокрую вещь, ее помещают вблизи печки или радиатора.

202. Испарение твердых тел: сублимация. Над поверхностью твердого вещества, так же как и над поверхностью жидкости, находятся молекулы этого вещества в парообразном состоянии. Об этом говорит хотя бы тот привычный нам факт, что лед и снег испаряются, даже если их все время держать при температуре ниже точки замерзания: высыхает же в холодный зимний день замерзшая мокрая одежда. А вот еще одно доказательство испарения твердых тел: запах камфоры можно почувствовать на расстоянии многих метров от кристаллов камфоры. Испарение твердых тел можно обнаружить в следующем замечательном опыте.

Поместим несколько кристаллов иода на часовое стеклышко и слегка нагреем их на пламени бунзеновской горелки. Над кристалликами появится видимый простым глазом пар иода, хотя при этом никакой жидкости не появлялось.

Очень много веществ при высоких температурах переходят из твердого состояния прямо в газообразное, минуя жидкое состояние. Испарение твердого вещества называют сублимацией (или возгонкой).

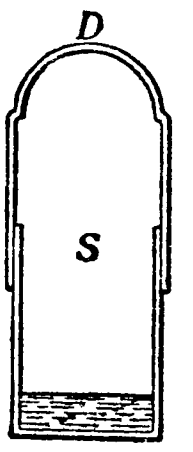


Рис. 166. Насыщенный пар.

203. Насыщенный пар. Вследствие испарения жидкость, находящаяся в открытом сосуде, должна непрерывно терять молекулы, причем число таких потерянных молекул ничем не ограничено: как только молекула выскакивает из жидкости, ее подхватывают и уносят потоки воздуха. И действительно, опыт показывает, что вода, налитая в открытый сосуд, все время улетучивается, пока, наконец, сосуд не делается совершенно сухим.

Предположим, однако, что жидкость испаряется в замкнутом пространстве, как, напр., на рис. 166. Тут уже молекулы, вылетающие из жидкости, должны оставаться в пространстве S. Ясно, что число молекул, перешедших из жидкости в это пространство с течением времени, все растет и растет. То есть, плотность пара в S становится все больше и больше. Но плотность пара может увеличиваться только до известного предела. Эта предельная плотность зависит от температуры и от рода жидкости. Как только этот предел достигнут, число молекул, возвращающихся в 1 сек. на поверхность жидкости, становится равным числу молекул, покидающих жидкость в течение 1 сек. Такой пар называют насыщенным. Если приподнять на некоторое время колокол D над насыщенным паром и тем самым уменьшить плотность пара, то опять в каждую секунду больше молекул будет выскакивать из жидкости, чем возвращаться в нее, — до тех пор пока плотность пара снова не достигнет исходной величины — плотности насыщенного пара.

Если же, наоборот, опустить колокол *D* над насыщенным паром ниже, плотность пара мгновенно увеличится. В каждую секунду в жидкость начнет возвращаться больше молекул, чем выскакивать из нее, — до тех пор пока плотность пара опять не достигнет своего насыщенного значения.

Итак, мы видим, что при данной температуре плотность насыщенного пара имеет постоянное значение.

Это значение меняется с температурой, но совершенно не зависит от изменений объема.

204. Давление насыщенного пара. Давление газа на стенки сосуда, как мы видели, обусловлено ударами его молекул. То же самое можно сказать относительно давления пара. Но при всякой заданной температуре плотность насыщенного пара может иметь только одно определенное значение. То есть, в *куб. см* пара может заключаться только некоторое определенное число молекул. Отсюда следует, что при всякой заданной температуре не только плотность, но и давление насыщенного пара может иметь только одно определенное значение. Это давление называется давлением насыщенного пара, соответствующим данной температуре.

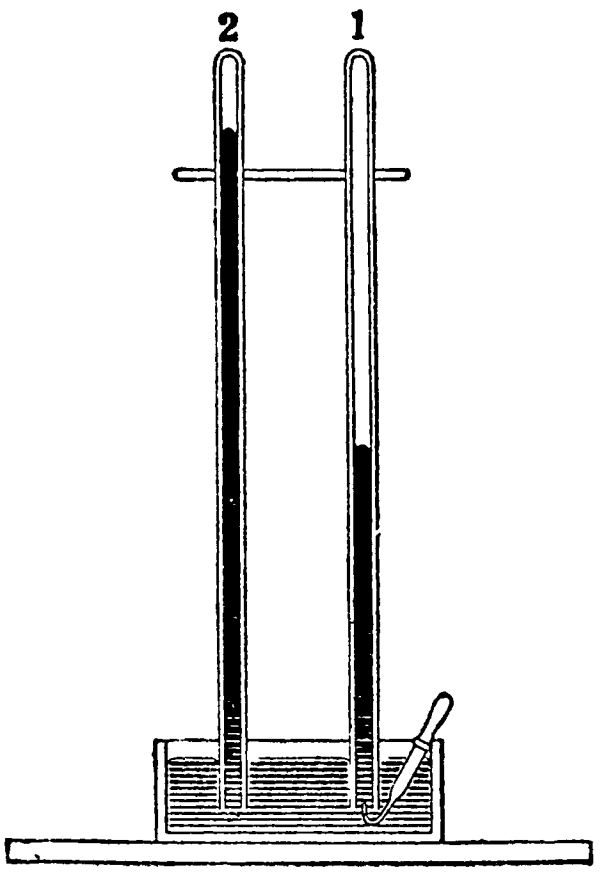


Рис. 167. Давление насыщенного пара.

Установим 2 торичеллиевых трубки, как показано на рис. 167. Затем с помощью изогнутой пипетки (рис. 167) введем снизу в трубку 1 каплю эфира. Эта капля сразу поднимется кверху, и часть эфира испарится в пустоте, имеющейся над ртутью. Давление паров эфира заставит столбик ртути опуститься, причем число сантиметров, на которое ртуть опустится, будет служить мерой давления этих паров. Заметим, что ртуть почти мгновенно упадет до самого низкого уровня, которого она, вообще, достигнет, — это показывает, что условие насыщения достигается очень быстро.

Давление насыщенного пара эфира при комнатной температуре равно 40 *см*. Быстро проведем пламенем бунзеновской горелки по трубкам рис. 167, вблизи верхнего уровня ртути. Давление паров эфира в трубке 1 быстро возрастает: это мы увидим по понижению уровня ртути. Этот опыт показывает, что с повышением температуры и давление и плотность насыщенного пара очень быстро возрастают. Этого и следовало ожидать согласно нашей теории: ведь при повышении температуры жидкости увеличивается средняя скорость ее молекул, а, следовательно, в каждую секунду большее количество молекул достигает скорости, достаточной для вылета из жидкости. Следующая таблица показывает, как быстро плотность и давление насыщенного пара возрастают с температурой.

ТАБЛИЦА ПОСТОЯННЫХ НАСЫЩЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА.

t	P	D	t	P	D
— 10°	2,2	0,0000023	11°	9,8	0,0000100
— 9°	2,3	0,0000025	12°	10,4	0,0000106
— 8°	2,5	0,0000027	13°	11,1	0,0000112
— 7°	2,7	0,0000029	14°	11,9	0,0000120
— 6°	2,9	0,0000032	15°	12,7	0,0000128
— 5°	3,2	0,0090034	16°	13,5	0,0000135
— 4°	3,4	0,0000037	17°	14,4	0,0000144
— 3°	3,7	0,0000040	18°	15,3	0,0000152
2°	3,9	0,0000042	19°	16,3	0,0000162
1°	4,2	0,0000045	20°	17,4	0,0000172
0°	4,6	0,0000049	21°	18,5	0,0000182
1°	4,9	0,0000052	22°	19,6	0,0000193
2°	5,3	0,0000056	23°	20,9	0,0000204
3°	5,7	0,0000060	24°	22,2	0,0000216
4°	6,1	0,0000064	25°	23,5	0,0000242
5°	6,5	0,0000068	26°	25,0	0,0000229
6°	7,0	0,0000073	27°	26,5	0,0000256
7°	7,5	0,0000077	28°	28,1	0,0000270
8°	8,0	0,0000092	30°	31,5	0,0000301
9°	8,5	0,0000087	35°	41,8	0,0000393
10°	9,1	0,0000093	40°	54,9	0,0000509

В таблице дано давление P в миллиметрах ртутного столба, и плотность D насыщенного водяного пара — при температурах t° С.

205. Влияние воздуха на испарение. Мы видели, что введение эфира в торичеллиеву трубку заставляло ртуть внезапно опускаться до ее конечного уровня. Это показывает, что в пустоте условие насыщения достигается почти мгновенно. Это можно было предвидеть, принимая во внимание огромные скорости молекул газов и паров.

Напустим в трубку 2 (рис. 167) немного воздуха, так чтобы высота столба ртути была от 45 до 55 *см*. Измерим точно высоту этого столба ртути. Чтобы исследовать влияние воздуха на испарение, введем в трубку каплю эфира. Оказывается, при этом ртуть не опускается внезапно, как в предыдущем опыте. Сначала уровень ее быстро понижается, а затем в течение нескольких часов продолжает медленно опускаться. При постоянной температуре в конце дня уровень ртути покажет, что давление паров эфира в точности равно давлению этих паров, наблюдавшемуся нами в трубке, не содержащей воздуха.

Этот опыт приводит нас к очень удивительному выводу, а именно: в пространство, заполненное воздухом, испарится ровно столько же жидкости, сколько и в пустоте. Т. е. присутствие воздуха сказывается только на сильном замедлении процесса испарения.

206. Объяснение замедляющего действия воздуха на испарение. Кинетическая теория очень просто объясняет это замедляющее действие воздуха на испарение. Дело в том, что в пустоте молекулы, вырвавшиеся из жидкости, сразу поднимаются кверху, а в присутствии воздуха эти молекулы сталкиваются с молекулами воздуха, не успев еще отойти от поверхности жидкости на сколько-нибудь значительное расстояние (вероятно, это расстояние меньше 0,00001 *см*). Молекулам жидкости приходится пробиваться сквозь молекулы

воздуха, и, прежде чем подняться кверху, они претерпевают почти что бесконечно большое число столкновений. Поэтому хотя пространство непосредственно над жидкостью может очень скоро заполниться насыщенным паром, тем не менее проходит очень много времени, пока это состояние насыщения распространится до самого верха сосуда.

Резюме. **Пар какой-нибудь жидкости называется насыщенным, если он соприкасается с этой жидкостью и обладает максимальной плотностью, возможной при данной температуре. Всякие попытки еще больше увеличить его плотность вызывают только конденсацию пара. И давление и плотность насыщенного пара зависят только от температуры и очень быстро увеличиваются с повышением температуры.**

Присутствие газов над поверхностью жидкости или твердого вещества замедляет их испарение. Но конечная плотность и давление их паров зависят от от присутствия этих газов.

Вопросы и задачи.

1. Объясните, почему нафталин испаряется при нормальной комнатной температуре?
2. При изготовлении барометра ртуть была налита в трубку, мокрую изнутри. Будет ли высота столба ртути в таком барометре такая же, как в барометре с сухой трубкой?
3. Сколько граммов воды испарится при 20° С в закрытом, пространстве, размеры которого суть 18 × 20 × 4 *м* (см. таблицу на стр. 147).
4. Какова будет при 15° С ошибка в показании барометра содержащего влагу?
5. Какова была при 20°С ошибка в барометре Отто фон Герике, вызывавшаяся присутствием водяных паров?

ГИГРОМЕТРИЯ, ИЛИ ИЗУЧЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ АТМОСФЕРЫ.

207. Ожижение водяных паров воздуха. Если бы воздух не замедлял испарения, мы были бы вынуждены жить в атмосфере, вполне насыщенной водяными парами, ибо испарение океанов, озер и рек почти что мгновенно насыщало бы воздух над всей земной поверхностью. При этом сырая одежда никогда бы не высыхала, и вообще все предметы все время были бы пропитаны влагой. Жизнь при этих условиях была бы чрезвычайно неудобной или даже попросту невозможной. Однако, благодаря медленности процесса испарения в воздухе (вспомним предыдущий опыт) водяной пар, всегда присутствующий в атмосфере, обычно далек от насыщения, даже в непосредственной близости озер и рек.

Но с понижением температуры количество пара, необходимое для насыщения, очень быстро уменьшается. Поэтому, когда в какой-нибудь ненасыщенной водяными парами области температура начинает падать, очень скоро достигается температура, при которой имеющееся количество водяного пара, приходящееся на 1 *куб. см* воздуха, уже достаточно для насыщения. Тогда, при дальнейшем понижении температуры, пар начинает ожижаться, т. е. переходить в жидкое состояние. В зависимости от того, где и как происходит это охлаждение, пар превратится в росу, в облака, в туман или в дождь.

208. Образование росы и инея. При охлаждении лучеиспусканием, когда земля ночью отдает тепло, полученное ею днем от солнца,

сама атмосфера остывает далеко не так быстро, как разные твердые тела на поверхности земли, напр., стебельки трав, деревья, камни и т. п. Слои воздуха, соприкасающиеся с этими остывшими телами, сами тоже охлаждаются. Содержащаяся в них влага приходит в состояние насыщения, а при дальнейшем охлаждении слои воздуха начинают осаждать на эти холодные предметы содержащуюся в них влагу в виде росы или инея.

Летом на кувшинах со льдом осаждаются капельки влаги, — это не что иное как роса. Если ожижение происходит на поверхности, температура которой ниже точки замерзания, то образуется и н е й; иней наблюдается, напр., на травах и на оконных стеклах.

209. Образование тумана. Иногда ночное охлаждение бывает настолько сильное, что не только остывают трава и деревья, но и температура всего воздуха вблизи земной поверхности опускается ниже температуры, при которой водяные пары, присутствующие в воздухе, делаются насыщенными. Тогда водяные пары ожижаются не только на поверхности твердых тел, но также и на частичках пыли, взвешенных в воздухе. Это и есть туман.

210. Образование облаков, дождя, изморози, града и снега. Теплые влажные потоки воздуха, поднимаясь с поверхности земли кверху, в области низкого давления п р е т е р п е в а ю т в с л е д с т в и е р а с ш и р е н и я з а м е т н о е п о н и ж е н и е т е м п е р а т у р ы (см. § 184, последние несколько строк).

Как только при этом температура делается ниже той, при которой водяные пары, присутствующие в воздухе, приходят в состояние насыщения, — излишек водяных паров немедленно ожижается на частичках пыли, и образуется о б л а к о. Иногда охлаждение настолько сильное, что осаждается значительное количество влаги. Тогда капли становятся большими, и выпадает дождь. Если капли дождя замерзают раньше, чем они достигнут земли, это называют и з м о р о з ь ю.

Когда сжижение начинается при температуре ниже точки замерзания, получаются с н е ж и н к и. Иногда сильные воздушные течения, сопровождающие грозы, подхватывают образующуюся влагу, поднимают и опускают ее, заставляя по нескольку раз переходить из снеговой в дождевую область и обратно. При этом образуются г р а д и н ы.

211. Точка росы. Т о ч к о й р о с ы н а з ы в а е т с я т е м п е р а т у р а, д о к о т о р о й н а д о о х л а д и т ь а т м о с ф е р у, ч т о б ы н а ч а л о с ь о ж и ж е н и е с о д е р ж а щ и х с я в н е й в о д я н ы х п а р о в. Для нахождения точки росы наливают воду в хорошо отполированный сосуд емкостью в 200 или 300 *куб. см* и опускают туда мелкие кусочки льда, основательно перемешивая при этом воду термометром. Точка росы — это температура, показываемая термометром в момент образования на полированной поверхности сосуда пленки влаги. Зимой точка росы обыкновенно ниже точки замерзания, поэтому для появления пленки влаги к воде со льдом приходится прибавлять соли. Можно несколько видоизменить опыт и пропускать струю воздуха через эфир, находящийся в полированной трубке (см. рис. 168).

212. Влажность атмосферы. Зная точку росы, легко можно, с помощью таблицы § 204 (стр. 147), найти величину, обычно называемую относительной влажностью, или степенью насыщения атмосферы. Относительная влажность есть отношение количества влаги, находящегося в данный момент в 1 *куб. см* воздуха, к количеству влаги, которое содержалось бы в этом *куб. см*, если бы воздух был полностью насыщен водяными парами.

Это отношение в точности равно отношению давления имеющихся в воздухе водяных паров к давлению, которое имели бы эти пары, если бы количество их было достаточное для насыщения.

Поясним примером метод нахождения относительной влажности.

Предположим, что в день опыта температура комнаты 25° С, а точка росы оказывается равной 15° С. Это значит, что влага, имеющаяся в воздухе, насыщает его при 15° С. Из приведенной выше таблицы находим в столбце P, что давление насыщенного пара при 15° С равно 12,7 *мм*. Значит, таково именно во время нашего опыта давление содержащегося в воздухе водяного пара. Из той же таблицы мы находим, что давление водяных паров, которые насыщали бы воздух при температуре комнаты, т. е. при 25° С, было бы 23,5 *мм*. Значит, в момент опыта воздух содержит $\frac{12,7}{23,5}$, т. е. 0,54 того количества водяных паров, которое он мог бы содержать. Поэтому говорят, что воздух насыщен на 54%, или что относительная влажность равна 54%.

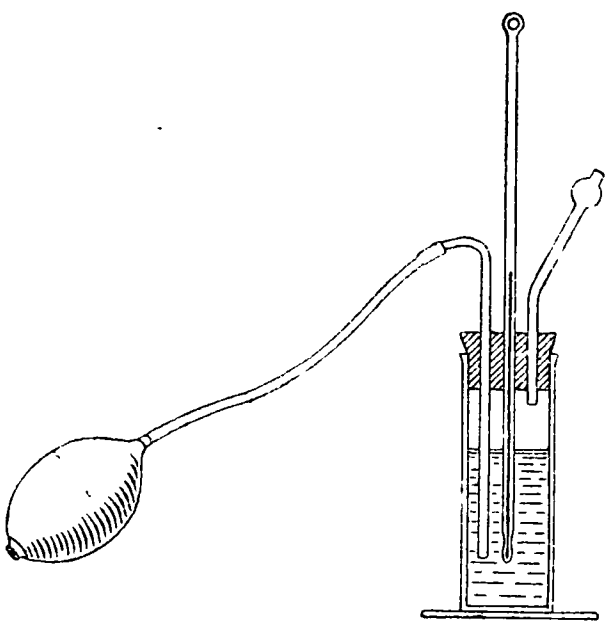
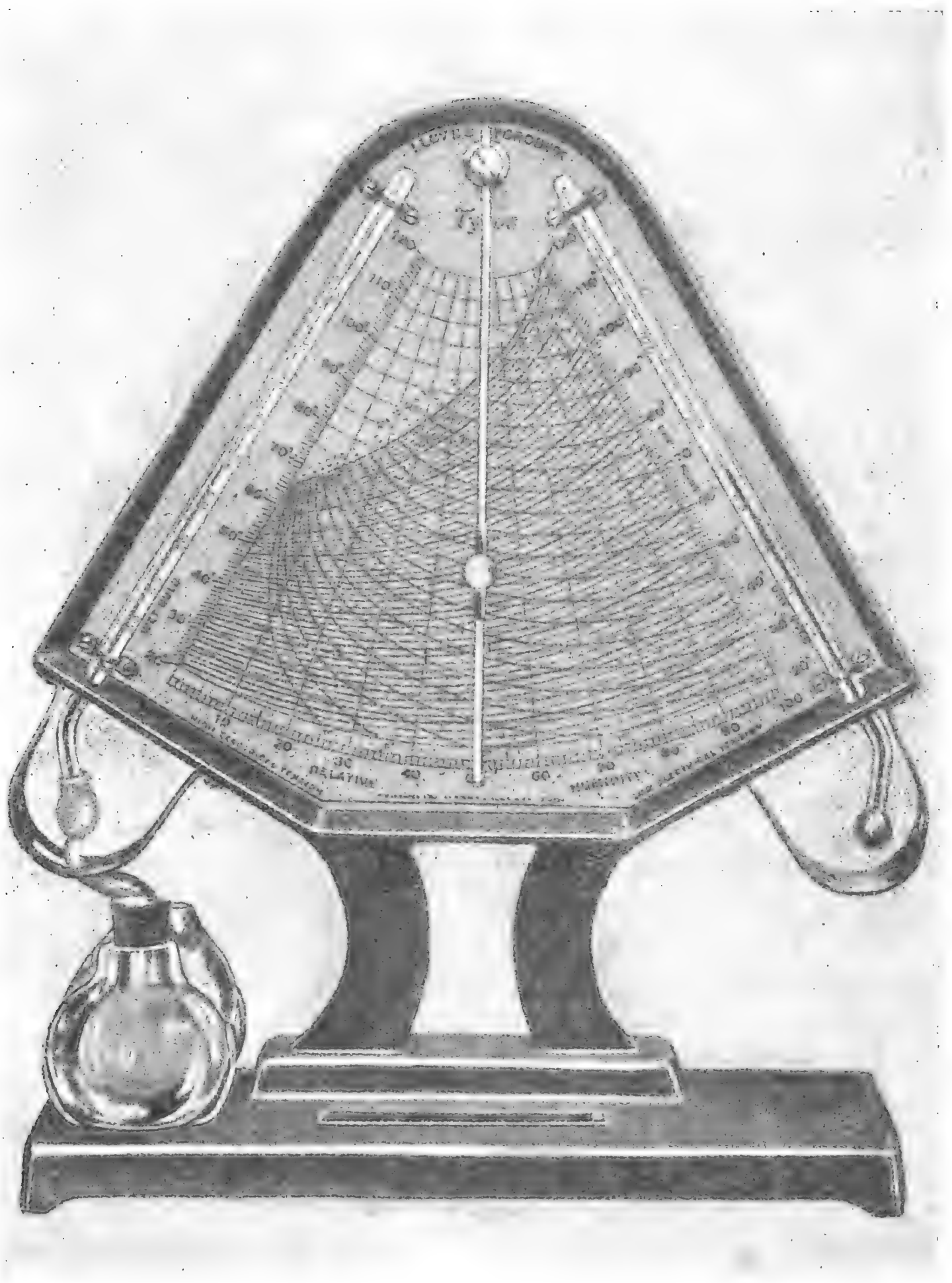


Рис. 168. Прибор для нахождения точки росы.

213. Практическое значение определения влажности. Влажность атмосферы дает много указаний относительно предвидящегося дождя или мороза. Для этой цели наблюдения над влажностью атмосферы ведутся на всех метеорологических станциях. Такие же наблюдения ведутся и в парниках, чтобы воздух не сделался слишком сухим для растений, а также в больницах, в общественных местах и даже в частных квартирах с целью поддерживать гигиенические условия жизни. Наиболее благоприятна для здоровья относительная влажность от 50 до 60%. В домах с низкой относительной влажностью люди чувствуют себя плохо и легко простуживаются, и дров уходит примерно на 10—25% больше нормы. По данным авторитетных гигиенистов, относительная влажность домов, отапливаемых паровым отоплением до 22°С, в среднем равна 30%, а при отоплении горячим воздухом — даже 25%. Это — меньше относительной влажности очень протяженных пустынь. При более высокой относительной влажности в доме испарение пота с нашего тела шло бы медленнее, а потому этот процесс меньше охлаждал бы наше тело. Поэтому в таких домах мы чувствовали бы себя хорошо и при более низкой температуре (см. § 214).

214. Охлаждающее действие испарения. Нальем в один плоский сосуд — воды, в другой — спирта, а в третий — эфира. Жидкости эти должны все быть при комнатной температуре. Пусть трое уча-

щихся тщательно измерят показания термометров: первый раз до погружения их в соответствующую жидкость и второй раз — после погружения. Во всех трех случаях температура жидкости в плоском сосуде окажется несколько ниже температуры воздуха, причем разница температур у эфира наибольшая, а у воды — наименьшая. Из этого опыта ясно, что испаряющаяся жидкость принимает темпера-



ГИГРОМЕТР.

туру несколько более низкую, чем у окружающей среды, и что вещества, испаряющиеся наиболее быстро, принимают наиболее низкую температуру.

В сухих, жарких местностях, где трудно достать лед, питьевую воду часто держат в кувшинах из необожженной глины. Вода медленно испаряется через пористые стенки сосуда и благодаря этому остается совершенно прохладной.

Есть еще один способ обнаружить охлаждающее действие испарения. Поместим по очереди по несколько капель упомянутых выше жидкостей в колбу прибора, показанного на рис. 148, и будем наблюдать за подъемом воды в трубке. Или, еще проще: капнем себе на руку по несколько капель этих жидкостей. Мы увидим, что испарятся они в таком порядке: сперва эфир, потом спирт, потом вода. И в таком же порядке возрастает их охлаждение при испарении.

Здоровый человек выделяет за 24 часа от $^1/_2$ до 1 литра испарины. Человек, занимающийся сильными физическими упражнениями, за это же время может выделить целое ведро испарины.

215. Объяснение охлаждающего действия испарения. Кинетическая теория дает очень простое объяснение охлаждающему действию испарения. Согласно этой теории, испарение понимается, как выскакивание с поверхности жидкости молекул, скорости которых сделались значительно выше средней. Ясно, что при такой постоянной потере наиболее быстрых молекул средняя скорость остающихся молекул все время понижается, а это значит, что понижается температура жидкости. Отсюда вытекает, что степень охлаждения должна быть пропорциональна скорости, с которой жидкость теряет свои молекулы. Т. е. из трех изученных нами жидкостей эфир, испаряющийся быстрее всех, должен и скорее всех охлаждаться. Это мы и наблюдали.

216. Замерзание при испарении. В § 205 было показано, что жидкость гораздо быстрее испаряется в пустоте, чем в пространстве, заполненном воздухом. Следовательно, если мы поместим жидкость под колокол воздушного насоса и начнем быстро выкачивать воздух, температура жидкости должна упасть гораздо сильнее, чем при испарении ее в воздухе. Это заключение можно проверить на следующем замечательном опыте.

На тоненькую стеклянную пластинку поместим капельку холодной, желательно ледяной воды. Затем наполним тонкое часовое стеклышко эфиром и опрокинем стеклышко над каплей воды. Все это поместим под колокол воздушного насоса и быстро выкачаем воздух. Через несколько минут откачки стеклышко окажется примерзшим к пластинке.

При испарении жидкого гелия в пустоте лейденский профессор Камерлинг Онэс получил в 1923 г. самую низкую из достигнутых температур, а именно — 272,18°С, отличающуюся от абсолютного нуля меньше, чем на 1°С.

217. Влияние потоков воздуха на испарение. Будем сильно обдувать воздухом 4 термометра, из которых один сухой, другой смочен водой, третий — спиртом, четвертый — эфиром. Каковы будут их показания? Оказывается, охлаждение всех трех мокрых термометров сильно увеличится при обдувании, а сухой термометр останется без изменения. Почему же обдувание так способствует испарению, а, следовательно и охлаждению? Дело тут в том, что потоки воздуха уносят слои насыщенного пара, находящиеся в непосредственной близости от жидкости, а на их место попадают ненасыщенные слои, которые не препятствуют испарению. Однако поведение сухого термометра показывает, что потоки воздуха производят охлаждение только тогда, когда они могут ускорить испарение. Сухое

тело, имеющее комнатную температуру, совершенно не охлаждается при обдувании его потоками воздуха.

218. Гигрометр. Устройство гигрометра с сухим и мокрым шариками (рис. 169) основано на охлаждении при испарении. Этот прибор состоит из двух термометров; шарик одного из них сухой, шарик же другого все время поддерживается влажным с помощью опущенного в воду фитиля. Пока воздух не насытится водяным паром, влажный термометр, благодаря испарению с его поверхности, показывает более низкую температуру, чем сухой. Разница показаний этих термометров будет тем больше, чем скорее происходит испарение, а эта скорость, в свою очередь, зависит от относительной влажности атмосферы. В вполне насыщенной атмосфере на поверхности влажного термометра не происходит никакого испарения, и поэтому он показывает ту же температуру, что и сухой. Сравнение показаний этого прибора с показаниями гигрометра, служащего для определения точки росы (рис. 168), дало возможность построить таблицы, позволяющие сразу, по показаниям обоих термометров нашего психрометра, определить и относительную влажность и точку росы. Приборы этого типа чрезвычайно удобны, а потому в практической работе пользуются почти исключительно ими. Показания их не очень надежны, если вокруг мокрого шарика не циркулируют потоки воздуха. При научных наблюдениях всегда создают такую циркуляцию. На стр. 151 изображен гигрометр с сухим и мокрым шариками; шкала его устроена так, что можно обойтись без всяких таблиц: относительная влажность, точка росы и прочие величины получаются прямо из пересечения соответствующих кривых. На рис. 169 изображен гигрометр, употребляющийся в Бюро погоды САСШ.

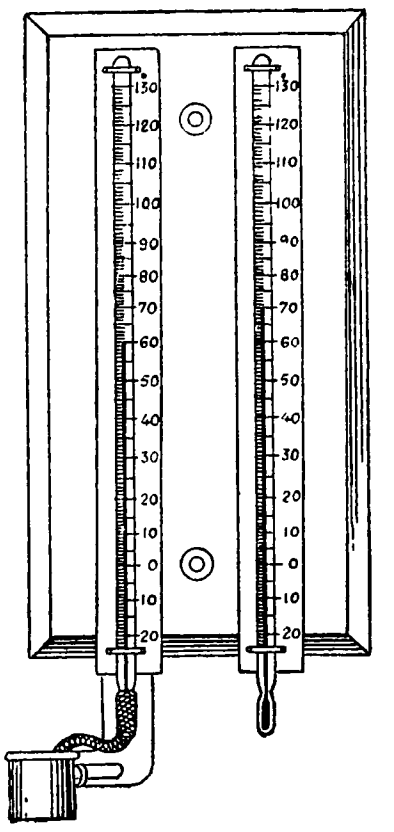


Рис. 169. Гигрометр.

219. Влияние увеличения поверхности на испарение. Пробирку, содержащую несколько капель воды, опустим в небольшой стакан с эфиром (см. рис. 170) и будем с помощью резиновой груши быстро пропускать через эфир струю воздуха. При достаточно сильной струе вода в пробирке замерзнет через несколько минут.

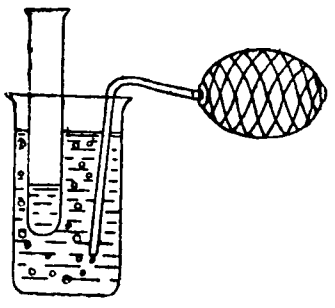


Рис. 170. Замораживание воды при испарении эфира.

Этот опыт особенно хорошо удается, когда стенки пробирки очень тонки, а стенки наружного сосуда довольно толстые. Почему?

Роль струи воздуха заключалась в этом опыте только в огромном увеличении испаряющейся поверхности: молекулы эфира, которые раньше вырывались только со свободной поверхности, теперь уносятся также и пузырьками воздуха.

220. Факторы, влияющие на испарение. Подводя итог всем полученным результатам, можно сказать следующее. Быстрота испарения зависит: 1) от природы испаряющейся жидкости, 2) от температуры испаряющейся жидкости, 3) от степени насыщения простран-

ства, в котором происходит испарение, 4) от плотности воздуха или другого газа над поверхностью испаряющейся жидкости, 5) от быстроты циркуляции воздуха над поверхностью испаряющейся жидкости, 6) от величины свободной поверхности жидкости.

Резюме. **При достаточном охлаждении ненасыщенный пар сделается насыщенным. При дальнейшем охлаждении пар сжижается. В зависимости от внешних условий, ожиженный пар принимает форму росы, инея, тумана, облаков, измороси, снега, дождя или града.**

Точкой росы называется температура, до которой надо охладить атмосферу, чтобы началось сжижение содержащихся в ней водяных паров.

Относительной влажностью называется отношение количества влаги, на самом деле содержащегося в 1 *куб. см,* воздуха, к тому количеству влаги, которое содержалось бы в 1 *куб. см,* если бы воздух был вполне насыщен водяными парами. Охлаждающее действие испарения вызывается тем, что наиболее быстрые молекулы покидают жидкость, — следовательно, средняя кинетическая энергия остающихся молекул соответственно уменьшается.

Вопросы и задачи.

1. Около носика кипящего чайника мы замечаем чистое пространство, а за ним — белое облачко. Объясните это.

2. Почему в холодный зимний день очки при входе с улицы в теплое помещение делаются влажными?

3. Обыкновенно, в холодный зимний день на кувшинах с ледяной водой, стоящих в теплой комнате, не образуется росы. Почему?

4. Объясните, как образуется иней на стебельках травы?

5. Объясните, при каких условиях иней может образоваться на внутренней, а не на внешней поверхности оконного стекла?

6. В комнате точка росы оказалась равной 8° С. Какова была там относительная влажность, если температура воздуха была 10° С? 20° С? 30° С? (см. таблицу на стр. 147.)

7. Расскажите какой-нибудь факт из вашего личного опыта, показывающий, что при испарении происходит охлаждение.

8. Нальем в стеклянный стакан и в глиняный сосуд одинаковые количества воды при одинаковой температуре. Через несколько минут между температурой обоих сосудов уже будет значительная разница. Который из них будет холоднее и почему?

Когда разница температур этих двух сосудов больше: при сухой или при влажной атмосфере?

9. Почему так трудно переносится жара в очень сырой летний день?

10. Какие факторы, влияющие на испарение, проявляются в следующих наблюдениях: 1) мокрый платок высыхает быстрее, если не комкать его, а, наоборот, разложить возможно шире. 2) белье лучше сохнет в ветреный день, 3) в холодный день белье сохнет не так быстро, 4) в сырые дни белье сохнет медленно. Объясните все эти факты.

КИПЕНИЕ.

221. Теплота парообразования. Опыты, разобранные в главе IV «Молекулярные движения», привели нас к заключению, что, на свободной поверхности всякой жидкости, молекулы часто приобретают настолько большие скорости, что преодолевают притяжение соседних молекул жидкости и поднимаются кверху, превращаясь в свободные молекулы газа. Далее, из тех же опытов мы видим, что, поскольку из жидкости выскакивают только молекулы, обладающие исключительно большими скоростями, **средняя кинетическая энергия** остающихся молекул при этом непрерывно

уменьшается. Следовательно, температура испаряющейся жидкости непрерывно падает до тех пор, пока потеря жидкостью тепла не сравняется с получением ею тепла из внешних источников. Поэтому испарение всегда происходит за счет тепловой энергии жидкости.

Число калорий теплоты, исчезающее при образовании 1 *г* пара, называется теплотой парообразования жидкости.

222. Теплота конденсации. Молекуле, вылетающей с поверхности жидкости, приходится преодолевать притяжение жидкости. При этом часть кинетической энергии молекулы превращается в потенциальную энергию разъединенных молекул. Это явление в точности напоминает картину мяча, подброшенного кверху: его кинетическая энергия при подъеме переходит в потенциальную энергию мяча, отделенного от земли. Падая обратно на землю, мяч при падении снова приобретает всю кинетическую энергию, потерянную им при подъеме. Точно также и молекулы пара, возвращающиеся в жидкость, должны получить обратно всю кинетическую энергию, утерянную ими при вылете из жидкости. Следовательно, можно ожидать, что каждый грамм пара при сжижении выделит столько же калорий, сколько он поглотил при своем образовании. На этом основано паровое отопление зданий: тепловая энергия, исчезающая при превращении воды в котлах в пар, вновь появляется в радиаторах при превращении пара в воду.

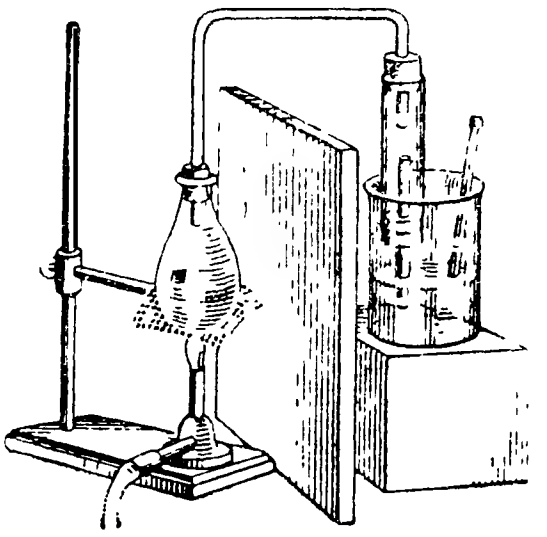


Рис. 171. Теплота испарения воды.

223. Измерение теплоты парообразования. Требуется точно определить число калорий, затраченных на испарение 1 *г* воды при 100° С или выделенных при сжижении 1 *г* пара при 100° С. Для этого надо в течение 2—3 минут быстро пропускать пар из прибора, показанного на рис. 171, в сосуд, содержащий, скажем, 500 *г* воды. Заметим себе начальную и конечную температуры и начальный и конечный вес воды. Если, напр., вес воды увеличился на 16,4 *г*, то, очевидно, 16,4 *г* пара превратились в воду. Если температура воды поднялась с 10° С до 30° С, то, очевидно, вода поглотила $500 \times (30 - 10) = 10\,000$ калорий тепла. Обозначим число калорий, выделяемых 1 *г* пара при сжижении, через x. Тогда общее количество калорий, поглощенных водой при сжижении пара, равно $16{,}4\,x$ калорий. Конденсированный пар сперва превращается в воду при 100° С, а затем эта вода охлаждается до 30° С. Во время охлаждения вода выделяет $16{,}4 \times (100 - 30) = 1\,148$ калорий. Отсюда, приравнивая тепло, поглощенное водой, теплу, выделенному паром, имеем:

$$10\,000 - 16{,}4x + 1\,148, \quad \text{т. е.} \quad x = 539 \text{ при } 100° \text{ С.}$$

Это обычный метод нахождения теплоты парообразования воды.

В настоящее время значение этой постоянной принимается равным 539 калорий на грамм.

224. Определение температуры кипения. Нагревая жидкость на огне, мы замечаем, что, каково бы ни было нагревание, невозможно нагреть жидкость выше некоторой определенной температуры. Это та температура, при которой пузырьки пара образуются на дне сосуда и поднимаются кверху, на поверхность жидкости, увеличиваясь

при подъеме в размерах. Эту температуру обыкновенно называют температурой кипения.

Однако можно дать и другое, более точное определение точки кипения. Ясно, что пузырьки пара могут появиться внутри жидкости только тогда, если давление пара в пузырьках больше или равно атмосферному давлению, давящему на поверхность жидкости сверху вниз. Действительно, если бы давление в пузырьке было меньше внешнего давления, пузырек сразу бы лопнул. Отсюда получаем определение: точка кипения — это температура, при которой давление насыщенного пара делается равным внешнему давлению.

В следующей таблице приведены точки кипения некоторых обыкновенных веществ:

Воздух	−180°C	Раствор поваренной соли (насыщенный)	108°C
Аммиак	33°C	Скипидар	160°C
Эфир	35°C	Ртуть	357°C
Алкоголь	78°C	Свинец	1800°C
Газолин	75—80°C	Железо	2450°C

225. Изменение точки кипения в зависимости от давления. Выше мы определили точку кипения, как температуру, при которой давление насыщенного пара равно внешнему давлению. Мы знаем, что давление насыщенного пара очень резко меняется с температурой. Следовательно, и точка кипения должна изменяться с изменением внешнего давления.

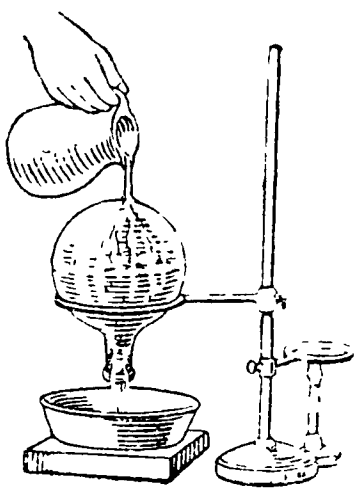


Рис. 172. Понижение точки кипения при уменьшении давления.

Сделаем такой опыт: нальем в колбу с выпуклым дном воды и вскипятим ее. После нескольких минут кипения, когда пар уже вытеснит из колбы почти весь воздух, закупорим колбу каучуковой пробкой, удалим ее от пламени и перевернем ее вверх дном, как показано на рис. 172. Температура быстро опустится ниже точки кипения. Если теперь полить колбу холодной водой, вода снова бурно закипит: от холодной воды пар в колбе сгустится, и, таким образом, давление в колбе понизится, и вода будет кипеть при температуре ниже 100° С. Однако кипение прекратится, как только образуется достаточно пара и восстановится прежнее давление. Эту операцию можно повторить несколько раз без нагревания.

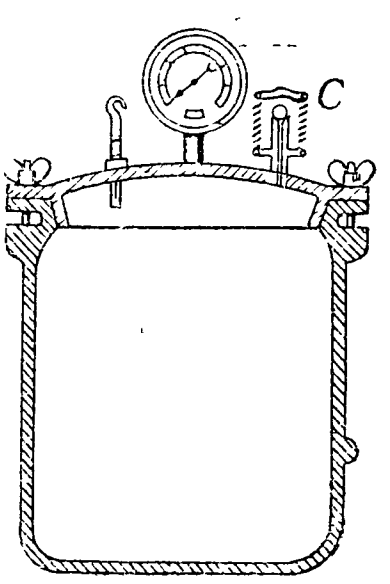


Рис. 173. Котел Папина.

В городе Квито в Экуадоре вода кипит при 90°С, на вершине Монблана — при 84°С; на горе Пайкс Пик — при 89°С. С другой стороны, в котле локомотива, где манометр часто указывает давление в 125 *кг*, точка кипения воды равна 208°С.

В гористых местностях для более быстрого приготовления пищи употребляют закрытые котлы, снабженные предохранительными клапанами (см. рис. 173) и известные под названием котлов Папина.

Польза их очевидна: ведь температура даже на несколько градусов выше, чем 100°С, уже заставляет зерна крахмала развариваться гораздо скорее, чем при 100°С. Котлы Папина больших размеров

употребляются на фабриках, перерабатывающих отбросы, для вытяжки желатина из костей и для обработки ценных жировых веществ.

При изготовлении консервов из фруктов и овощей кувшины или чаны для окончательной стерилизации помещают в закрытые котлы.

226. Испарение и кипение. Единственная разница между кипением и испарением заключается в том, что при испарении в парообразное состояние переходят только молекулы со с в о б о д н о й п о в е р х н о с т и ж и д к о с т и, в то время как при кипении в парообразное состояние переходят не только молекулы со свободной поверхности, но и с поверхности пузырьков пара, существующих внутри жидкости. И единственной причиной резкого увеличения быстроты испарения при достижении температуры кипения является огромное увеличение п о в е р х н о с т и испарения, наступающее в момент образования пузырьков.

Поднять температуру выше точки кипения невозможно потому, что благодаря присутствию пузырьков поверхность все время увеличивается как раз настолько, что потеря тепла вследствие испарения в точности равна притоку тепла от нагревания.

227. Искусственное приготовление льда. На рис. 174 показана современная машина для искусственного добывания льда. Компрессор, при-

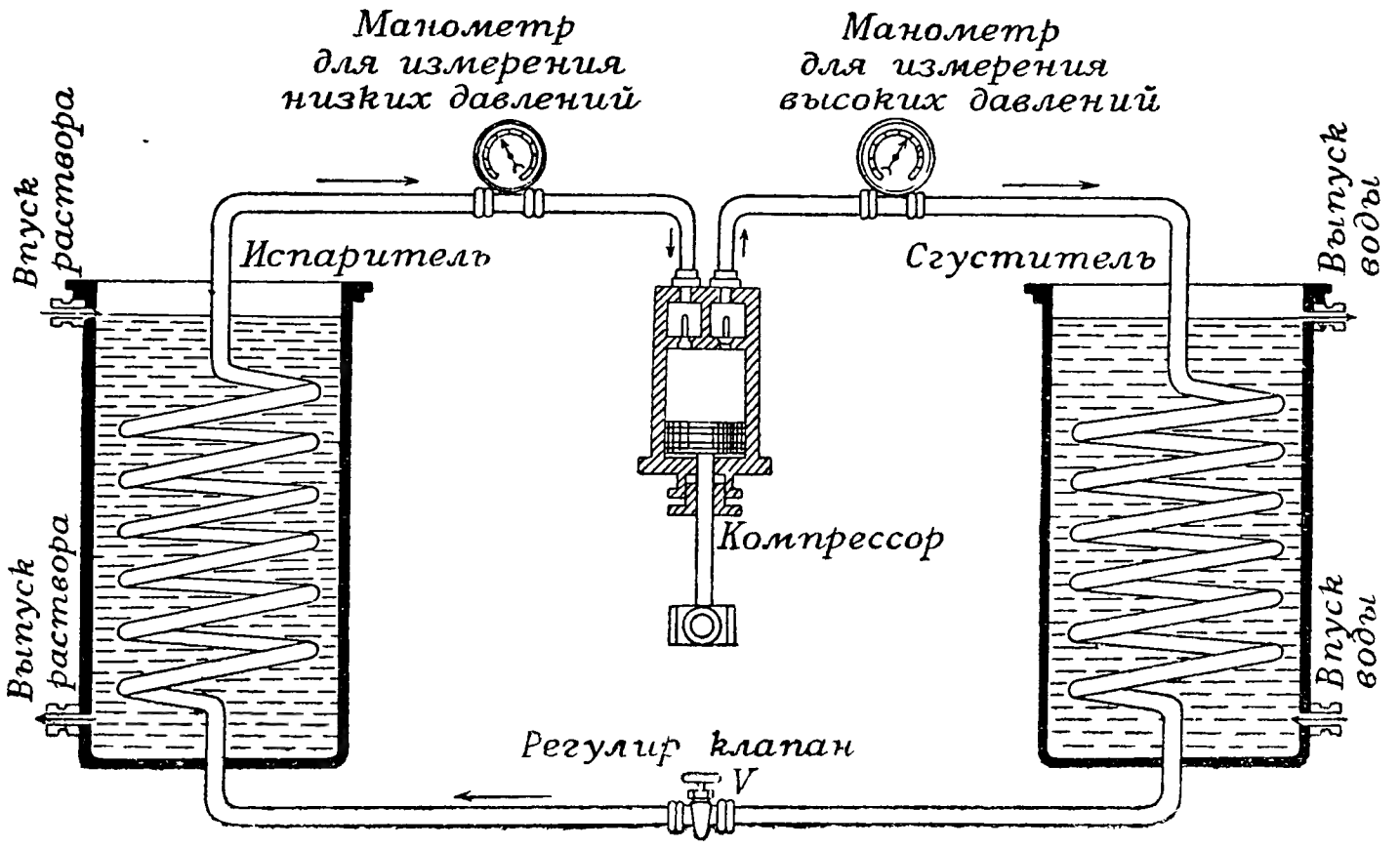
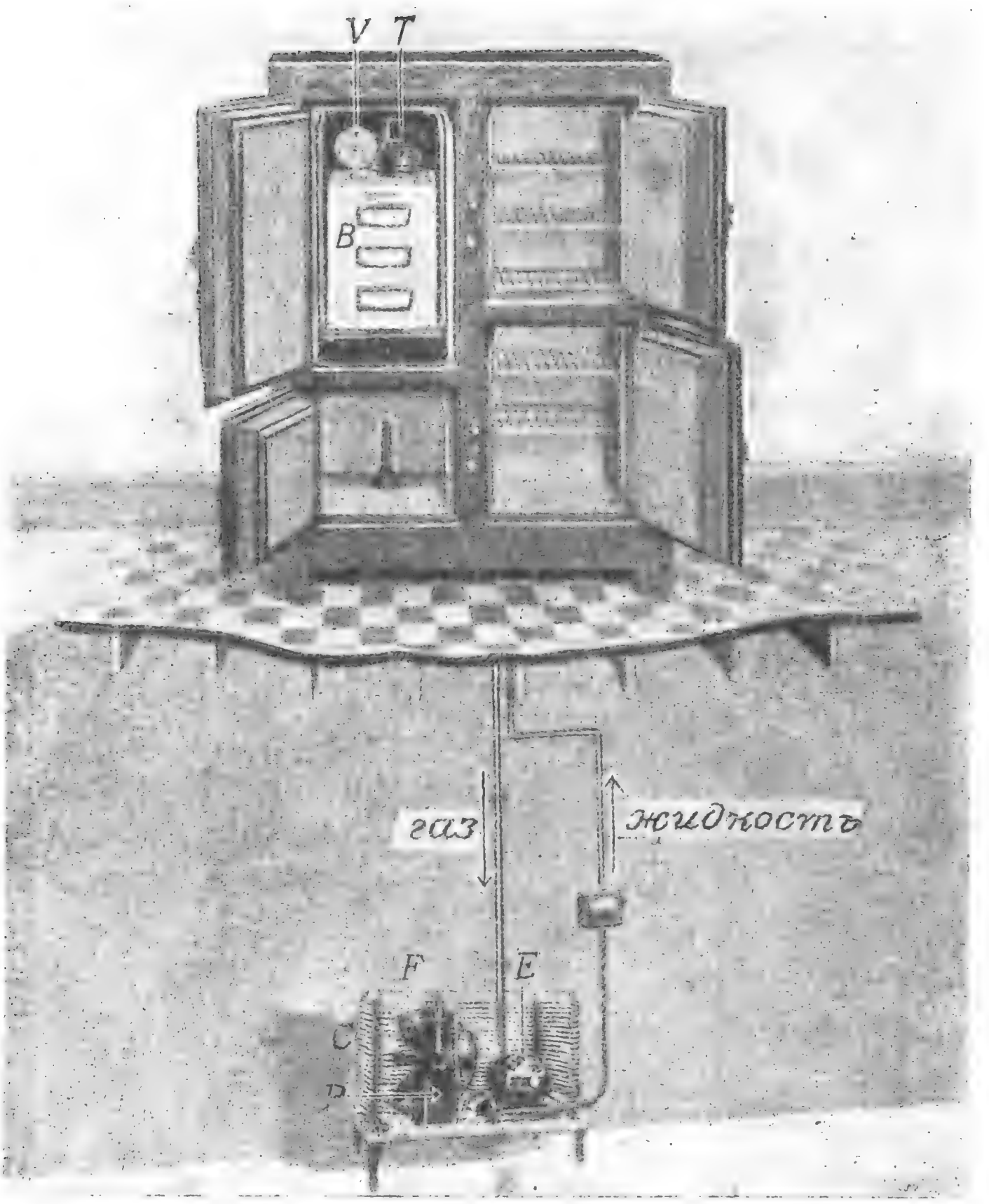


Рис. 174. Приготовление льда.

водимый в движение мотором, толкает газообразный аммиак под давлением в 75 *кг* в змеевик конденсатора, показанного с правой стороны рисунка. Там аммиак превращается в жидкость. Теплота конденсации аммиака уносится проточной водой, все время обтекающей змеевик конденсатора. Из конденсатора жидкий аммиак очень медленно пропускается через регулирующий клапан *V* в змеевик испарителя. Оттуда испарившийся аммиак так быстро откачивается насосом, что давление внутри змеевика не возрастает свыше 16 *кг*. Компрессор, как видите, исполняет тут два рода функций: из одной половины аппарата он выкачивает газ, а в другую — нагнетает. Быстрое испарение жидкого аммиака в испарителе охлаждает змеевик испарителя до температуры — 15° С. Змеевик весь погружен в крепкий раствор поваренной соли, вследствие чего температура этого раствора понижается до — 7°, — 8° С ниже нуля и он, циркулируя вокруг чанов с водой, заставляет ее замерзнуть. Теплота парообразования аммиака при — 15° С равна 314 калориям.

Большие катки в закрытых помещениях устраивают таким же образом: проводят горизонтально тысячи метров железных труб, покрывают их водой, и затем пропускают по трубам очень холодный раствор поваренной соли. Вода над трубами замерзает.



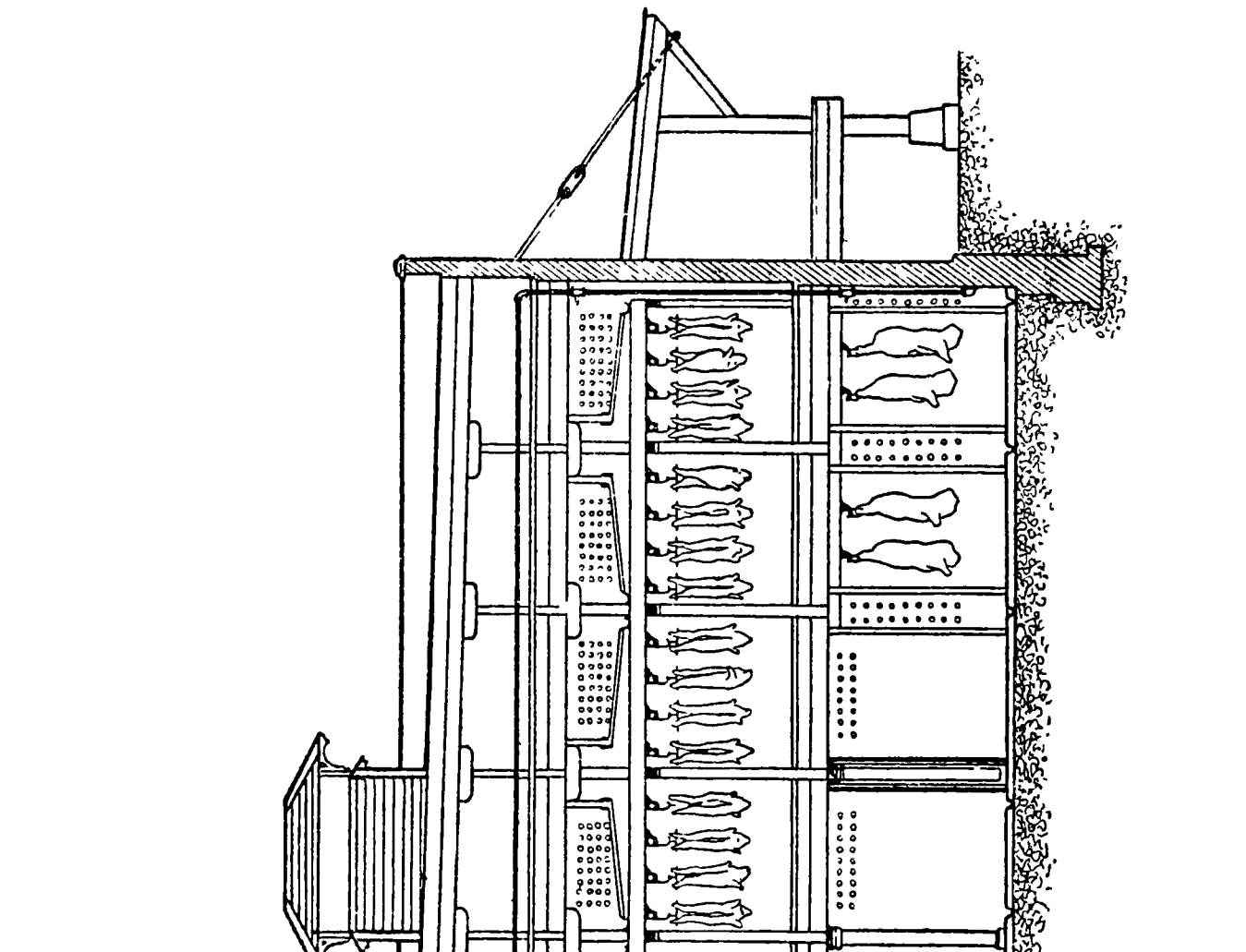
ДОМАШНИЙ ЛЕДНИК ОХЛАЖДАЕМЫЙ ЖИДКИМ SO_2.

Компрессорный насос *P*, приводимый в движение электрическим мотором *E*, сжимает и превращает в жидкость газ SO_2, находящийся в змеевике *C*. Теплота конденсации частично уносится феном *F*. Жизкий SO_2 поступает через клапан *V* в испаритель, погруженный в резервуар с раствором *B*. Там жидкий SO_2 быстро испаряется при пониженном давлении в этом змеевике, и поддерживает весь резервуар при температуре ниже точки замерзания. Термостат *T* замыкает и размыкает ток, идущий в электрический мотор, и поддерживает нужную температуру. Резервуар с раствором играет здесь роль куска льда в старых ледниках. В некоторых системах нет резервуара с раствором и змеевик испарителя сам играет роль льда.

228. Холодные кладовые. Искусственное охлаждение фабрик и холодных кладовых производится точно таким же способом. Раствор охлаждают тем же способом, что и при приготовлении льда, и затем насосом прогоняют его по змеевикам, проложенным в остужаемом помещении.

Ниже дан чертеж такого охладительного приспособления (рефрижератора) при пакгаузе.

Аммиак превращается в конденсаторе в жидкость, которая потом испаряется в змеевике рассольного резервуара. В некоторых системах охладителей вместо аммиака употребляют углекислый газ, но устройство их совершенно аналогично только что описанному. Иногда обходятся без раствора поваренной соли, а прямо с помощью вентиляторов продувают воздух



ПАКГАУЗ С РЕФРИЖЕРАТОРОМ.

охлаждаемого помещения через холодный змеевик, содержащий испаряющийся аммиак или углекислый газ. Именно так охлаждают театры и гостиницы.

229. Перегонка (дистилляция). В колбу *B* нальем воду, содержащую в растворе какую-нибудь анилиновую краску, и вскипятим ее (рис. 175). При этом пар будет попадать в трубку *T* и сжижаться там благодаря охлаждению трубки *T* проточной холодной водой, все время протекающей через

рубашку Y. Оказывается, собирающаяся в *P* вода не будет содержать никаких следов растворенной анилиновой краски.

Итак, в парах раствора твердого вещества в жидкости совершенно отсутствует растворенное вещество. В некоторых случаях желательно получить в *P* чистую жидкость, как, напр., при производстве спирта; в других случаях — твердое вещество, остающееся в *B*, — напр., при изготовлении сахара. При производстве белого сахара испарение должно происходить при низкой температуре, чтобы сахар не пригорал. Поэтому в котле с помощью воздушного насоса поддерживают довольно низкое давление, позволяющее раствору кипеть при достаточно низких температурах.

230. Дробная перегонка. Существуют растворы, у которых обе составных части летучи, — напр., смесь спирта и воды. При кипячении таких растворов получаются пары обеих жидкостей. Но количество этих паров не одинаковое: больше паров дает жидкость, у которой точка кипения ниже и, значит, давление паров выше. Следовательно, имея в *B* (рис. 175) раствор, содержащий 50% спирта и 50% воды, можно, очевидно, при помощи испарения и сжижения получить в *P* раствор, содержащий гораздо больший процент спирта. Повторяя эту операцию несколько раз, можно получать все более и более чистый спирт.

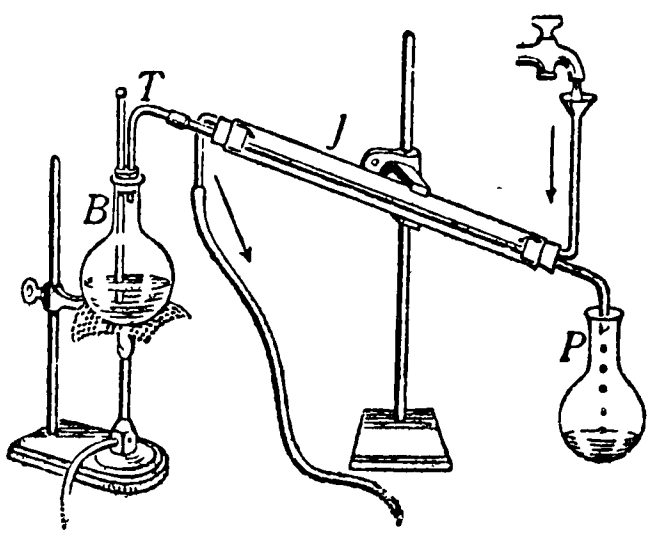


Рис. 175. Дистилляция.

Этот процесс называется дробной перегонкой. Точка кипения смеси лежит между точками кипения спирта и воды, причем она тем выше, чем больше процент воды в растворе. Дробной перегонкой пользуются для отделения газолина и керосина от нефти и для отделения различных сортов газолина друг от друга.

231. Охлаждение при растворении. Бросим в небольшой стакан с водой, имеющей комнатную температуру, щепотку обыкновенной поваренной соли и будем перемешивать воду термометром. Температура воды упадет на несколько градусов. Если смешать одинаковые весовые количества азотно-аммиачной соли (NH_4NO_3) и воды при 15° С, температура их опустится до — 10° С. Если в момент прибавления азотно-аммиачной соли температура воды около 0° С, и перемешивание производится пробиркой, в которую налита холодная вода, вода в пробирке замерзает.

Эти опыты показывают, что для разрушения кристаллов твердых веществ всегда требуется затрата тепловой энергии — как при плавлении, так и при растворении.

232. Точки замерзания растворов. Погрузим пробирку, содержащую раствор одной части поваренной соли на десять частей воды, в «охлаждающую смесь» воды, льда и соли. Оказывается, в пробирке начнет образовываться лед не при 0°С, а при нескольких градусах ниже нуля. Между тем образующийся лед оказывается совершенно свободным от соли, также как и водяной пар, поднимающийся над океаном или, вообще, над любым соленым

раствором. Этот факт и дает нам возможность понять, почему точка замерзания соленого раствора ниже точки замерзания чистой воды. Действительно, охладить вещество до температуры замерзания значит попросту настолько понизить его температуру, т. е., другими словами, настолько уменьшить среднюю скорость его молекул, чтобы силы сцепления жидкости могли сблизить молекулы и образовать кристаллы. При замерзании соленого раствора силы сцепления воды, стремящиеся превратить воду в лед, должны преодолеть не только движения молекул воды, но и притяжение молекул соли. Значит, чтобы кристаллизация могла наступить в этом случае, скорость движения молекул воды должна быть уменьшена, т. е. температура должна быть ниже, чем для кристаллизации чистой воды. Отсюда ясно, что чем больше соли в растворе, тем ниже должна быть точка замерзания. Это действительно имеет место. Наинизшая точка замерзания воды, достигнутая с помощью прибавления к ней поваренной соли, это — 22°С. Это точка замерзания насыщенного раствора поваренной соли.

233. Охлаждающие смеси. При погружении снега или льда в сосуд с водой снег и лед тают, и при этом температура воды падает до точки замерзания чистой воды. Лед, погруженный в соленую воду, тоже тает и доводит температуру соленой воды до точки замерзания раствора. Эта точка замерзания может быть на один, два или двадцать два градуса ниже нуля, в зависимости от концентрации раствора. Итак, мы видим, что, погружен ли лед в чистую или в соленую воду, всегда его растает достаточное количество, чтобы довести температуру всей массы жидкости до точки замерзания: каждый растаявший грамм льда поглощает 80 калорий теплоты. Следовательно, сильное охлаждающее действие смеси льда с солью объясняется просто-напросто тем, что точка замерзания соленого раствора ниже точки замерзания чистой воды.

Наиболее выгодная пропорция — это 3 части снега и мелко толченого льда на одну часть поваренной соли. При помощи смеси трех частей хлористого кальция с двумя частями снега можно достигнуть температуры в — 55°С.

При этой температуре замерзает ртуть.

Резюме. **Теплотой парообразования жидкости называется число калорий теплоты, поглощаемых при образовании 1 *г* пара и выделяемых при сжижении 1 *г* пара, — и то, и другое — без изменения температуры. Для воды при 100 С это число равно 539.**

Температурой кипения жидкости называется температура, при которой образуются пузырьки пара этой жидкости, поднимающиеся кверху через всю массу жидкости. Или, иначе: температура кипения — это температура, при которой давление насыщенного пара делается равным внешнему давлению на поверхность жидкости.

Перегонкой называется процесс испарения и конденсации, при котором жидкость отделяется от растворенного в ней твердого вещества, или отделяются друг от друга смешанные жидкости, имеющие различные точки кипения.

Охлаждение при растворении твердого вещества объясняется работой, совершаемой при разъединении молекул твердых кристаллов. При этом теряется скорость молекул, т. е. исчезает тепло. Точка замерзания у соленой воды ниже, чем у чистой воды, так как притяжение молекул соли стремится помешать молекулам воды сгруппироваться в кристаллы чистого льда. При более низкой темпе-

ратуре (т. е. при меньшей энергии движения) силам сцепления удается преодолеть это препятствие и образовать чистый лед.

Раствор соли и льда охлаждается оттого, что точка замерзания соленой воды (температура равновесия между соленой водой и льдом) ниже точки замерзания чистой воды. Поэтому лед, соприкасаясь с солью, начинает таять, и 80 калорий на грамм, необходимых для таяния льда, отнимаются от смеси.

Вопросы и задачи.

1. После того как вода закипает в открытом сосуде, проходит довольно долгое время, пока она вся выкипит. Объясните это.

2. Каков смысл утверждения, что теплота парообразования жидкого аммиака при 5° С равна 314 калориям на грамм?

3. Опустим яйца в кипящую воду. Зависит ли время, в течение которого яйца сварятся вкрутую, от величины пламени?

4. Температура воды, образующейся в радиаторе парового отопления, часто равна температуре входящего в трубы радиатора пара. Каким же образом нагревается комната?

5. Почему ожоги, причиненные паром, гораздо опаснее, чем ожоги от горячей воды при той же температуре?

6. В радиаторе 2 *кг* пара при 100° сгустились в воду в течение 1 часа, и вода вышла из радиаторов при 90° С. Сколько калорий пошло на нагревание комнаты в течение часа?

7. Сколько нужно калорий для превращения 10 *г* льда при 0° С в пар при 100° С?

8. Сколько граммов пара при 100° С надо сконденсировать в 1 *кг* снега при 0° С, чтобы превратить этот снег в воду при 0° С?

9. Каким образом можно из морской воды получить чистую питьевую воду?

10. Объясните, почему зимой обледенелые тротуары посыпают солью?

11. Растают ли куски льда, брошенные в воду, температура которой поддерживается равной 0° С? Почему? Что случится со льдом, погруженным в насыщенный раствор поваренной соли, температура коего 0° С? Изменится ли температура раствора?

12. Назовите две причины, по которым океан замерзает не так легко, как озеро?

13. Сколько калорий тепла идет на таяние каждого грамма смеси льда и соли в мороженице? Откуда берется это тепло? Замерзали ли бы сливки, если бы точка замерзания сливок была та же, что и точка замерзания соленого раствора?

14. Сколько *кг* льда может быть образовано из воды при 0° С, если отнять от воды столько тепла, сколько надо для испарения 10 *кг* аммиака (теплоту парообразования жидкого аммиака считайте равной 314 калориям на грамм)?

ПАРОВЫЕ МАШИНЫ.

234. Современная паровая машина. До сих пор мы разбирали только такие превращения энергии, при которых механическая энергия превращалась в тепловую. Во всех тепловых двигателях происходит как раз обратный процесс: тепловая энергия превращается в механическую. Для уяснения того, каким образом происходит это превращение, лучше всего разобрать различные типы современных тепловых двигателей. Паровая машина современного типа была изобретена Джемсом У а т т о м. В момент своего изобретения (1768 г.) он работал в механической мастерской университета в Глазго.

Чтобы понять устройство такой машины, рассмотрим чертеж на рис. 176. В котле путем нагревания воды получается пар. По трубе

S он поступает в паровую коробку V, а оттуда через проход N в цилиндр C; там давление пара сдвигает поршень P влево. На рисунке видно, что, при движении шатуна R влево, так называемая эксцентриковая тяга R^1, управляющая золотником V, движется направо.

Значит, когда поршень дойдет до левого конца своего пути, канал N будет закрыт, и пар начнет поступать через канал M. Вследствие этого пар будет оказывать давление на поршень слева направо, соединяя в то же время правую часть цилиндра, наполненную отработавшим паром, с паровыпускной трубой E.

Этот процесс повторяется все время, стержень R^1 открывает и закрывает проходы M и N как раз в нужные моменты времени, чтобы поршень непрерывно двигался взад и вперед вдоль цилиндра.

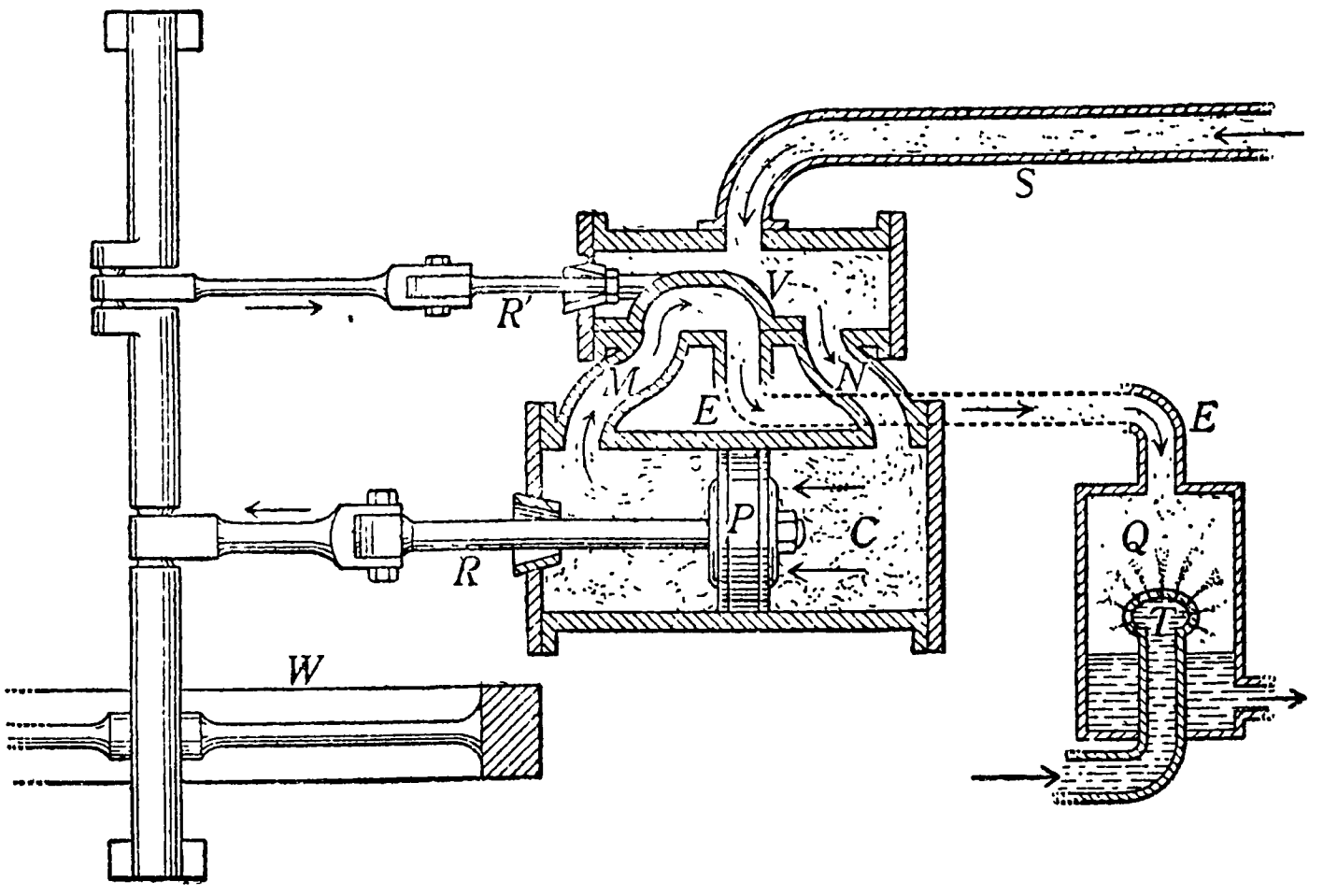


Рис. 176. Схематизированный чертеж паровой машины.

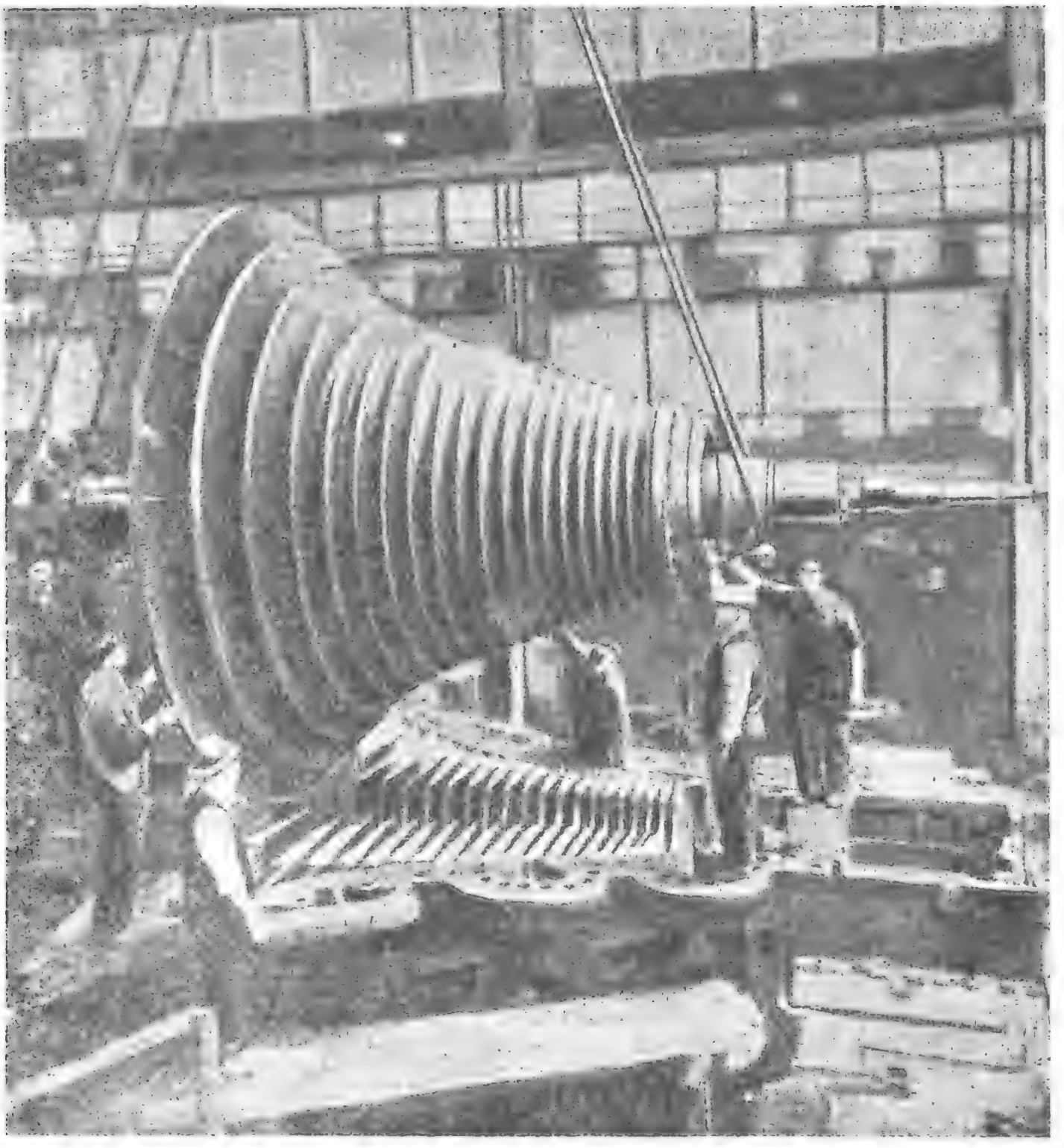
В современной машине золотник V построен и прилажен так, что приток пара из котла прекращается, когда поршень сделал только часть своего полного хода, и остальную часть пути поршень проделывает под уменьшающимся давлением пара, находящегося в цилиндре. На ось насажено тяжелое маховое колесо W, большая инерция которого обеспечивает постоянство скорости машины. Движение оси можно с помощью ремня, проходящего через W, передать любому механизму.

Внутри котла давление и температура пара очень высоки (§ 225). В цилиндре температура пара падает, так как он производит работу: толкает поршень.

Паровая машина — это механизм, производящий полезную работу, превращая тепловую энергию в механическую.

235. Паровые машины с конденсацией и без конденсации (высокого и низкого давления). В большинстве стационарных машин паровыпускная труба E ведет к конденсатору, состоящему из камеры Q, в которой все время распыляется струя холодной воды T. В этой

камере с помощью воздушного насоса поддерживается пониженное давление. В лучших машинах давление в Q не превышает 3 или 5 *см* ртутного столба, что составляет не больше 80 *г* на *кв. см*.



РОТОР ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ.

Большой ротор 60 000-килоуаттной паровой турбины—новейший и наиболее производительный вид паровой машины. На рисунке видно огромное количество подвижных лопат, на которые попадает пар, направляемый туда под наиболее выгодными углами неподвижными лопатами (часть их видна под ротором); ряды неподвижных лопат чередуются с рядами подвижных. Эта турбина может работать с паром, несколько более нагретым и более упругим, чем большинство паровых машин, и выпускает она его при несколько более низкой температуре, чем обычно. Это, согласно принципу Карно, и определяет ее производительность. В настоящее время производятся опыты с турбинами, употребляющими пар при давлении в 600 *кг*. Роторы паровых турбин вращаются со скоростью от 200 до 30 000 оборотов в минуту. Периферическая скорость громадного колеса, изображенного выше, равна 20 *км* в *м*., т. е. свыше 300 *м* в сек. Эта турбина потребляет 4 625 *кг* пара в минуту.

Таким образом, конденсатор понижает давление на ту сторону поршня, которая в машинах высокого давления сообщается с атмосферой, с 1,2 *кг* до 80 *г* на *кв. см*. А вследствие этого повышается

разность давлений, существующих по обе стороны поршня, т. е. повышается движущая сила.

236. Эксцентрик. На практике стержень R^1 не закреплен неподвижно, как на рис. 176; он имеет некоторую свободу движения благодаря так называемому эксцентрику. Эксцентрик состоит из круглого диска K (рис. 177), неподвижно соединенного с осью A, причем центр диска K не совпадает с центром **оси** A. Вместе с осью A вращается и диск K. Диск охватывается кольцом C, соединенным со стержнем R^1. Таким образом при вращении диска стержню R^1 сообщается движение вперед и назад; при этом золотник V в нужные моменты открывает для пара попеременно проходы M и N.

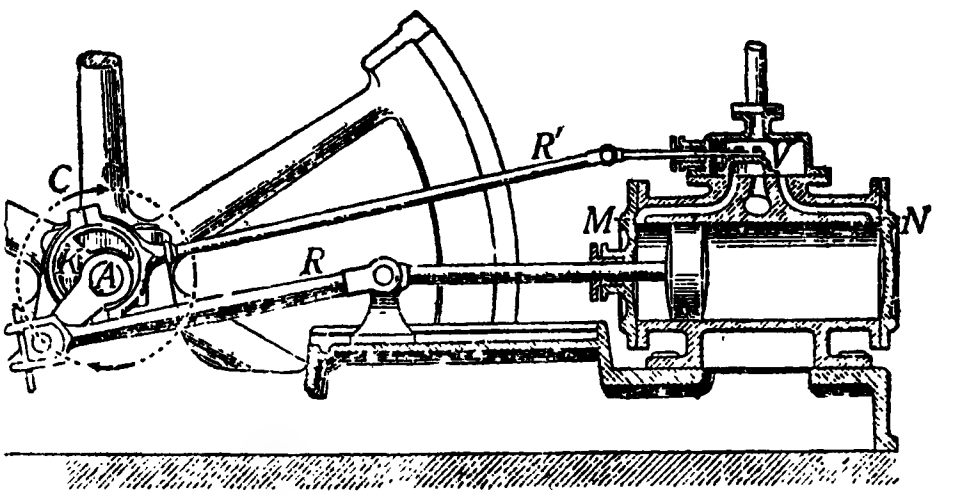


Рис. 177. Эксцентрик.

237. Котел. Во время работы машины пар очень быстро выходит из котла. Так, напр., железнодорожный локомотив потребляет от 3 до 6 m воды в час. Поэтому надо, чтобы поверхность нагрева была по возможности большей.

При трубчатом котле это достигается тем, что огонь проходит по большому количеству металлических труб, погруженных в жидкость. Устройство печи и котла видно на чертеже рис. 178. (Старый и современный типы показаны на стр. 126.)

238. Тяга. Для того чтобы огонь прошел по трубам B котла, нужна сильная тяга. В локомотиве тяга достигается тем, что пар, выходящий из цилиндра C (рис. 178), попадает в дымовую трубу через воздуходувку F Сильная струя, проходящая через F, захватывает часть воздуха из дымо-

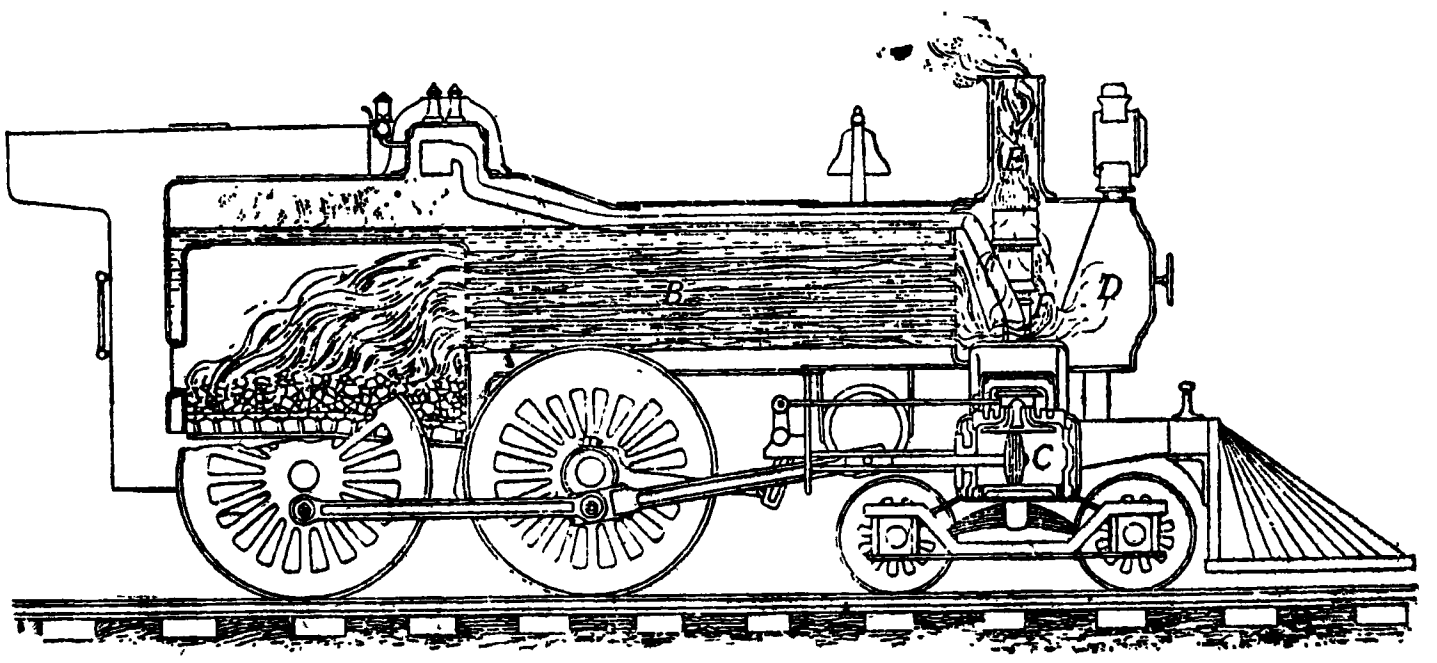


Рис. 178. Чертеж локомотива.

вой коробки D, создавая таким образом в D пониженное давление: вследствие этого, устанавливается мощная тяга из печи по трубам B в коробку D. Потребление угля в обыкновенном локомотиве от $^1/_4$ до 1 m в час.

В стационарных машинах тяга достигается очень большой высотой дымовой трубы. Так как давление, проталкивающее воздух через печь, равно разности весов одинаковых столбов воздуха внутри и вне трубы, то ясно, что давление это тем больше, чем больше высота дымовой трубы. Вот почему на крупных заводах бывают такие огромные трубы.

239. Регулятор. На рис. 179 изображено замечательное изобретение Уатта, так называемый регулятор, автоматически регулирующий

быстроту хода машины. Когда машина начинает работать слишком быстро, тяжелые вращающиеся шары B расходятся и поднимаются, заставляя при этом специальный клапан частично закрывать проход пара в цилиндр и тем самым уменьшать скорость машины.

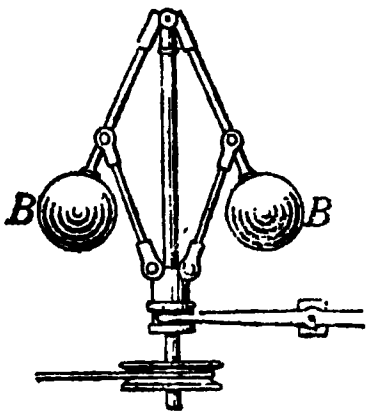


Рис. 179. Регулятор.

240. Паровые машины двойного расширения (компаунд). В машине с одним единственным цилиндром пар выходит из цилиндра наружу, не отдав еще всей своей силы. Такой потери энергии не происходит в машине-компаунд, где частично отработавший пар поступает во второй цилиндр, площадь которого больше, чем площадь первого цилиндра.

Современные машины с наибольшим коэффициентом полезного действия снабжены тремя, а иногда и четырьмя такими цилиндрами и их соответственно называют машинами тройного или четверного расширения. На рис. 180 изображена связь между двумя последовательными цилиндрами поперечной компаунд-машины. Автоматические механизмы, в принципе не отличающиеся от эксцентрика, заставляют клапаны C^1, D^2 и E^2 одновременно открываться и пропускать пар из котла в малый цилиндр A, позволяя в то же время частично отработавшему пару проходить через D^2 в B. Использованный пар выходит через E^2 из верхнего конца цилиндра B. В верхней точке пути поршней P и P^1, C^1, D^2 и E^2 автоматически закрываются, и в то же время одновременно открываются C^2, D^1 и E^1, вследствие чего меняется направление движения поршней. Оба поршня насажены на один и тот же вал.

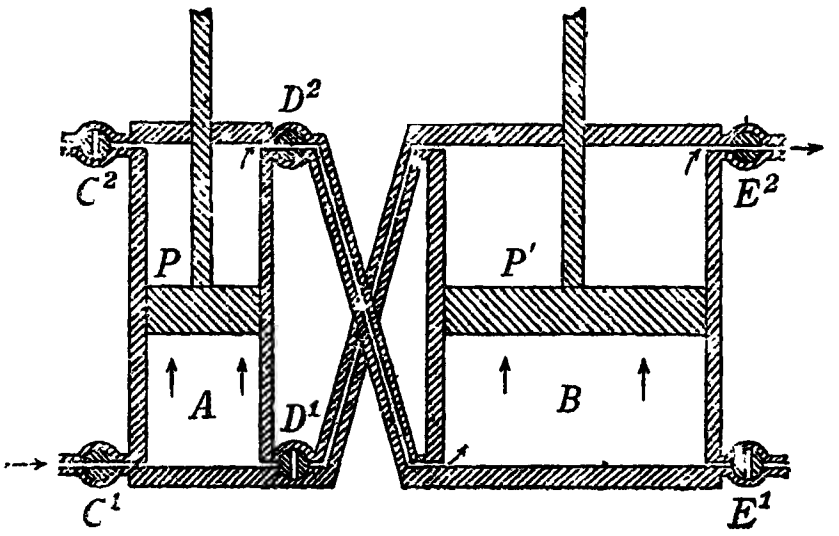


Рис. 180. Цилиндры паровой машины компаунд.

241. Коэффициент полезного действия паровой машины. Мы видели, что некоторое данное количество механической энергии можно полностью превратить в тепловую энергию. Такое превращение происходит, напр., когда движущееся тело останавливается благодаря сопротивлению трения. Обратный процесс, т. е. превращение тепловой энергии в механическую, отличается от этого тем, что только сравнительно небольшая часть тепла, получившегося от горения, может быть превращена в работу. Действительно. Нетрудно видеть, что во всякой паровой машине хотя бы часть тепла обязательно уходит вместе с отработавшим паром наружу или в конденсатор.

Эта потеря так велика, что даже в идеальной паровой машине нельзя было бы превратить в работу больше 25% теплоты, полученной от горения. В некоторых современных паро-генераторных установках, где топливом служит нефть, и где все потери тепла доведены до минимума, достигается поразительно высокий коэффициент полезного действия: $24^1/_2$% тепловой энергии горючего превращается в электрическую энергию. В самых лучших локомотивах используется не более 13% тепла. Коэффициентом полезного действия теплового двигателя называется отношение использованного, т. е. превращенного в работу, тепла ко всему затраченному теплу. Таким образом, коэффициент полезного дей-

ствия лучших локомотивов равен всего $\frac{13}{25}$, или 52% коэффициента полезного действия идеального двигателя.

242. Паровая турбина. Новейший вид теплового двигателя — это паровая турбина (см. стр. 164). В принципе она очень похожа на обыкновенную ветряную мельницу. Вся разница заключается в том, что в турбине не воздух, а пар ударяется с огромной скоростью о лопатки, радиально насаженные по окружности колеса, приводимого во вращение.

Однако, в противоположность ветру, пар все время особым сопло направляется так, что он попадает на лопатки под самым выгодным углом (см. рис. 181). Далее. Пар, проходя мимо одного ряда лопаток (показанного напр., на рис. 181) затрачивает далеко не всю свою энергию. Поэтому, на практике, пар всегда пропускают через несколько серий лопаток (см. рис. 182). При этом ряды лопаток попеременно неподвижно связаны то вращающимся валом, то с неподвижным внешним кожухом машины. Эти последние ряды служат только для направления пара на соседние подвижные ряды под самыми выгодными углами. Таким образом, пар попеременно попадает то на подвижные, то на неподвижные лопатки, пока он не

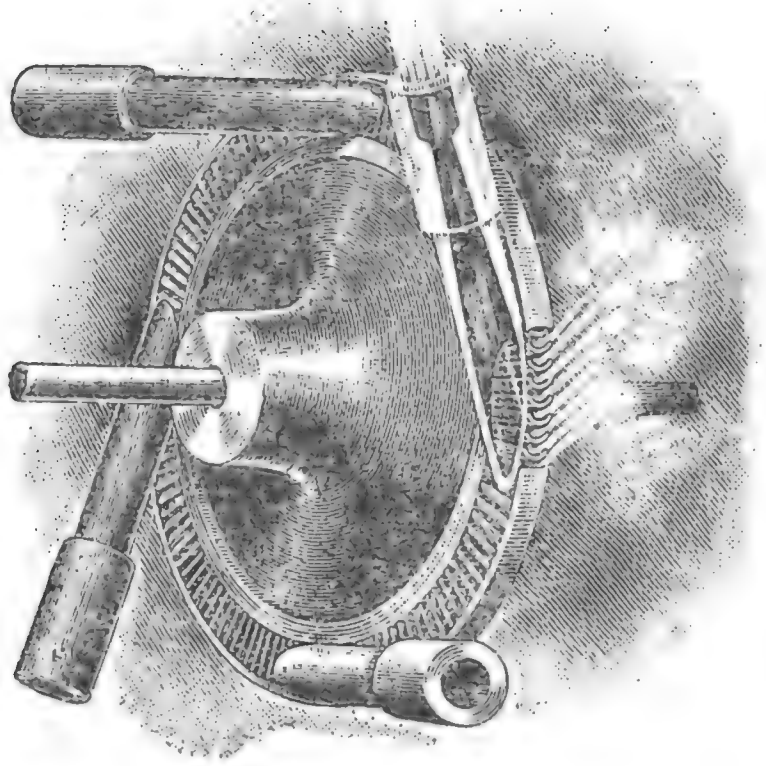


Рис. 181. Принцип паровой турбины.

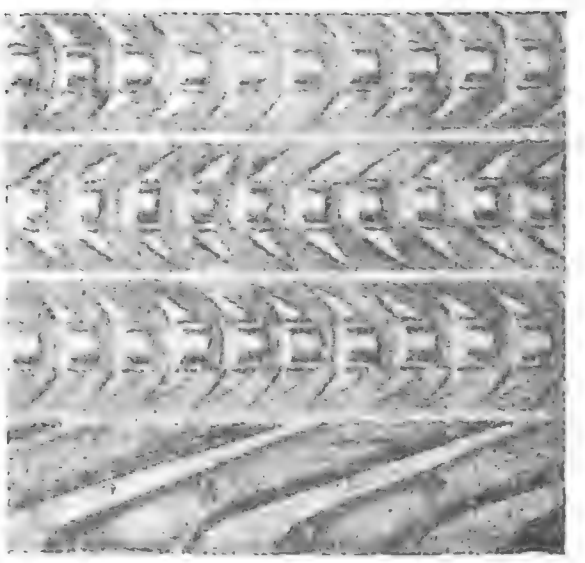


Рис. 182. Пути частичек пара в турбине Кертиса.

отдаст всей своей энергии. Часто число рядов лопаток доходит до шестнадцати. В этих турбинах превращение тепловой энергии в механическую происходит всецело за счет изменений момента пара, когда он проходит по каналам лопаток. А в поршневой паровой машине это превращение происходит благодаря статическому давлению пара на поршень.

В настоящее время турбины получают все более и более широкое распространение, особенно на крупных силовых станциях. Они имеют целый ряд преимуществ перед поршневыми паровыми машинами. Прежде всего, работают они почти без всякого сотрясения, а потому фундамент для них может быть гораздо более легкий и дешевый. Кроме того, они занимают менее $^1/_{10}$ площади, занимаемой обыкновенной паровой машиной такой же мощности.

Впрочем, коэффициент полезного действия паровых турбин очень немногим выше, чем у лучших поршневых машин, так как в конденсаторах этих последних можно поддерживать более низкое давление. Самые быстроходные пароходы, делающие около 40 миль в час, приводятся в движение паровыми турбинами. Один из самых гигантских пароходов, когда-либо спущенных на воду, это «Беренгария». Длина ее — 306 *м*, ширина — 32,5 *м*, а высота (от киля до ее девятой палубы) — 33,4 *м*. Водоизмещение ее 57 000 *т*, а скорость равна $22^1/_2$ узлам. Этот пароход приводится в движение 4 паровыми турбинами, общая мощность которых 61 000 лошадиных сил. Одно из этих гигантских колес имеет 50 000 лопаток и развивает 22 000 л. с.

Резюме. **Паровая машина превращает тепловую энергию в механическую, пользуясь при этом перегретым паром, который охлаждается во время производства движения или совершения работы.**

В паровой машине с конденсацией (низкого давления) разность давлений на поршень увеличивается, приблизительно, до 1,2 *кг* на 1 *кв. см*.

Машина-компаунд продуктивнее одноцилиндровой машины, так как в ней можно использовать больший процент всей энергии пара до его выхода из машины.

Паровые турбины занимают относительно немного места, они почти не сотрясаются и более полно используют энергию расширения пара.

Вопросы и задачи.

1. Какова температура пара внутри котла локомотива по сравнению с температурой выходящего пара? Объясните подробно.
2. На ведомых колесах ломокотива против точки прикрепления к ведущему валу имеется некоторая масса железа. Почему это делается?
3. Почему вода в локомотиве не закипает при 100° С?
4. Когда манометр в локомотиве показывает 21 *кг* на *кв. см*, температура пара равна 207° С. Объясните, каким образом пар производит такое большое давление.
5. Какова тяга паровоза в 1 000 л. с., когда он идет со скоростью 25 *км* в час и развивает свою полную мощность?
6. Пусть среднее давление в цилиндре паровой машины равно 10 *кг* на *кв. см*, а площадь поршня равна 427 *кв. см*. Какую работу производит поршень в течение одного хода, длина которого 50 *см*? Сколько калорий теплоты теряет при этом пар?

ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ.

243. Принципы двигателя внутреннего сгорания. Воткнем в пробку две железные или стальные проволочки и сблизим их концы S (примерно, на 8 *мм*) (рис. 183). Затем, опрокинув бутылку с водой, введем в нее столько светильного газа, чтобы он, вытеснив воду, заполнил $^1/_5$ объема бутылки, причем вытесненная вода вытечет. Или же с помощью распылителя введем в бутылку немного бензина или газолина (нужное количество надо определить на опыте). Затем закупорим бутылку пробкой и присоединим к внешним концам проволочек a и b концы хорошо изолированных проводов, идущих от индукционной катушки. Между проволочками проскочит искра, и, если смесь в бутылке не слишком «богата» и не слишком «бедна», произойдет сильный взрыв, причем пробка подскочит к потолку.

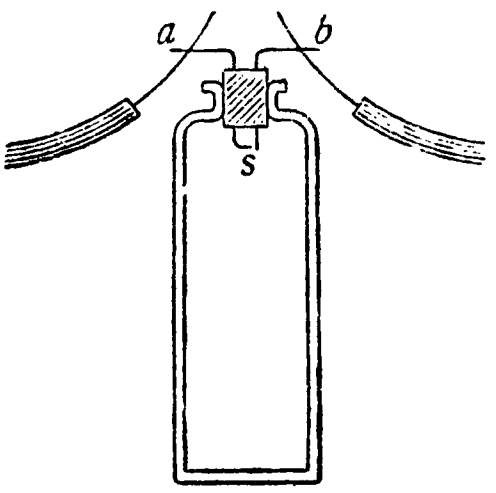
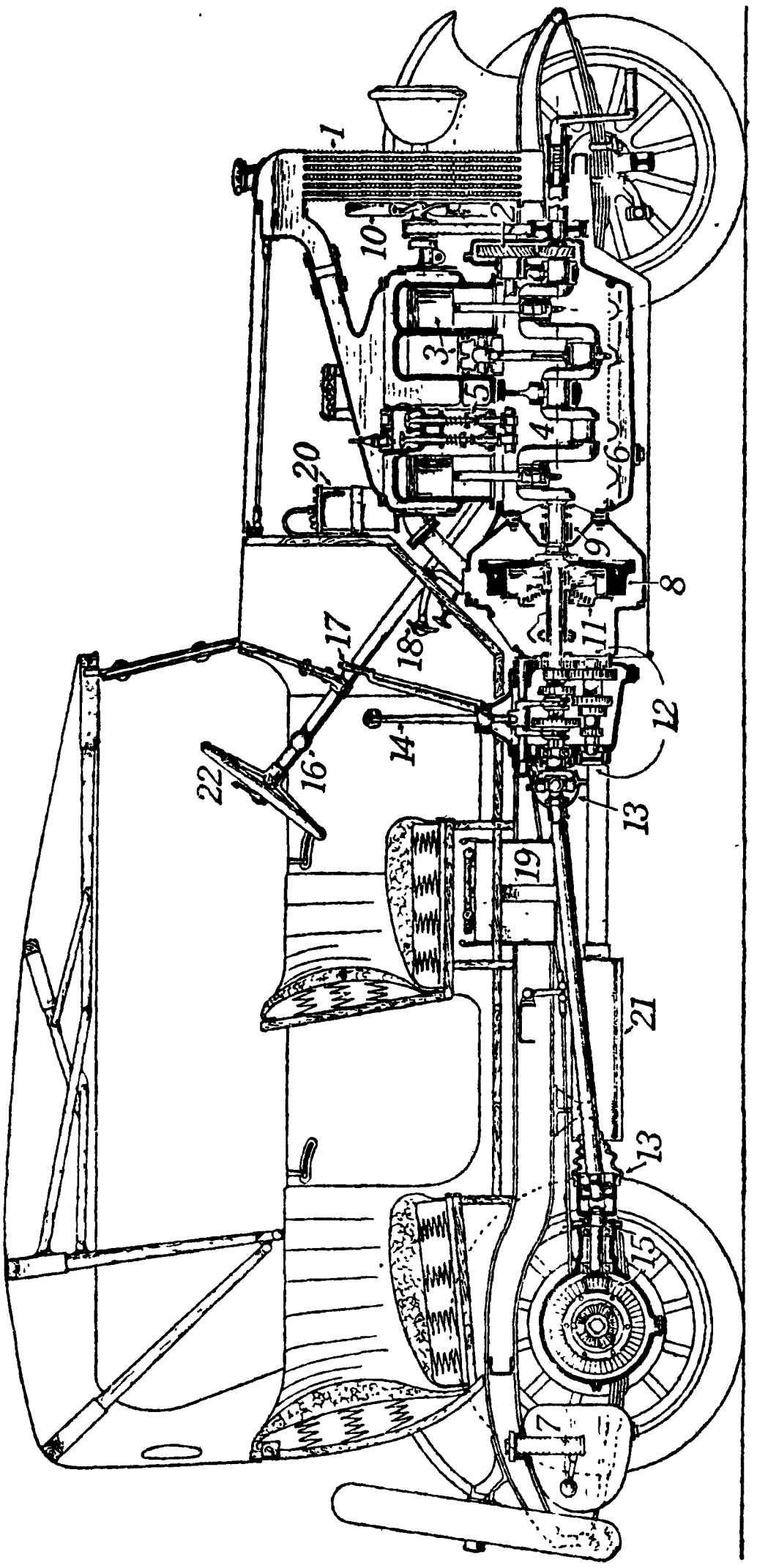


Рис. 183. Смесь паров газолина и воздуха взрывается.

(В целях безопасности надо брать тяжелую, круглую бутылку. Хорошенько оберните ее металлической сеткой.)

За последние 20 лет газовые двигатели приобрели такое же важное значение в современной жизни, как и паровые двигатели. Газовые двигатели приводятся в движение происходящими в цилиндре в нужные моменты взрывами смеси газа и воздуха. На рис. 184 показаны 4 стадии, на которые удобно разделить весь процесс, все время повторяющийся в каждом цилиндре такого двигателя. Предположим, что двигатель уже приведен в движение. При первом ходе поршня P, когда он опускается (см. (1)), включающий клапан D открывается посредством кулака, насаженного на вращающийся кулачный вал (см. стр. 170). Взрывчатая смесь газа и воздуха входит

через D в цилиндр. Когда поршень поднимается (см. (2)), клапан D закрывается посредством спиральной пружины. Смесь газа и воздуха оказывается сжатой в маленьком пространстве в верхней части цилиндра. Взрывчатая смесь зажигается электрической искрой. Сила



РАЗРЕЗ СОВРЕМЕННОГО АВТОМОБИЛЯ, С УКАЗАНИЕМ ГЛАВНЫХ ЧАСТЕЙ ЕГО МЕХАНИЗМА.

1, радиатор; 2, зубчатые колеса, управляющие клапанами, в зависимости от положения поршней; 3) поршни; 4) коленчатый вал; 5) клапан и стержни; 6) резервуар с маслом; 7) сосуд с бензином; 8) маховое колесо; 9) главная задняя ось; 10) фен; 11) муфта, соединяющая вал двигателя с трансмиссией; 12) трансмиссия; 13) универсальный шарнир; 14) рычаг; 15) главная зубчатая передача и шестерня; 16) электрическая контрольная стрелка; 17) запасный тормоз; 18) ножной рычаг служебного тормоза; 19) аккумуляторная батарея; 20) вакуумная питательная; система; 21) глушитель; 22) штурвал.

взрыва быстро толкает поршень вниз (см. (3)). В начале нового подъема поршня (см. (4)) открывается выводной клапан E, и при подъеме поршня отработавшие газообразные продукты взрыва выводятся из цилиндра. Таким образом опять восстанавливаются на-

чальные условия, и весь цикл, состоящий из 4 ходов поршня, начинается сначала.

Двигатель получает энергию от взрывающегося газа только во время третьего хода поршня. Поэтому маховое колесо всегда делают очень тя-

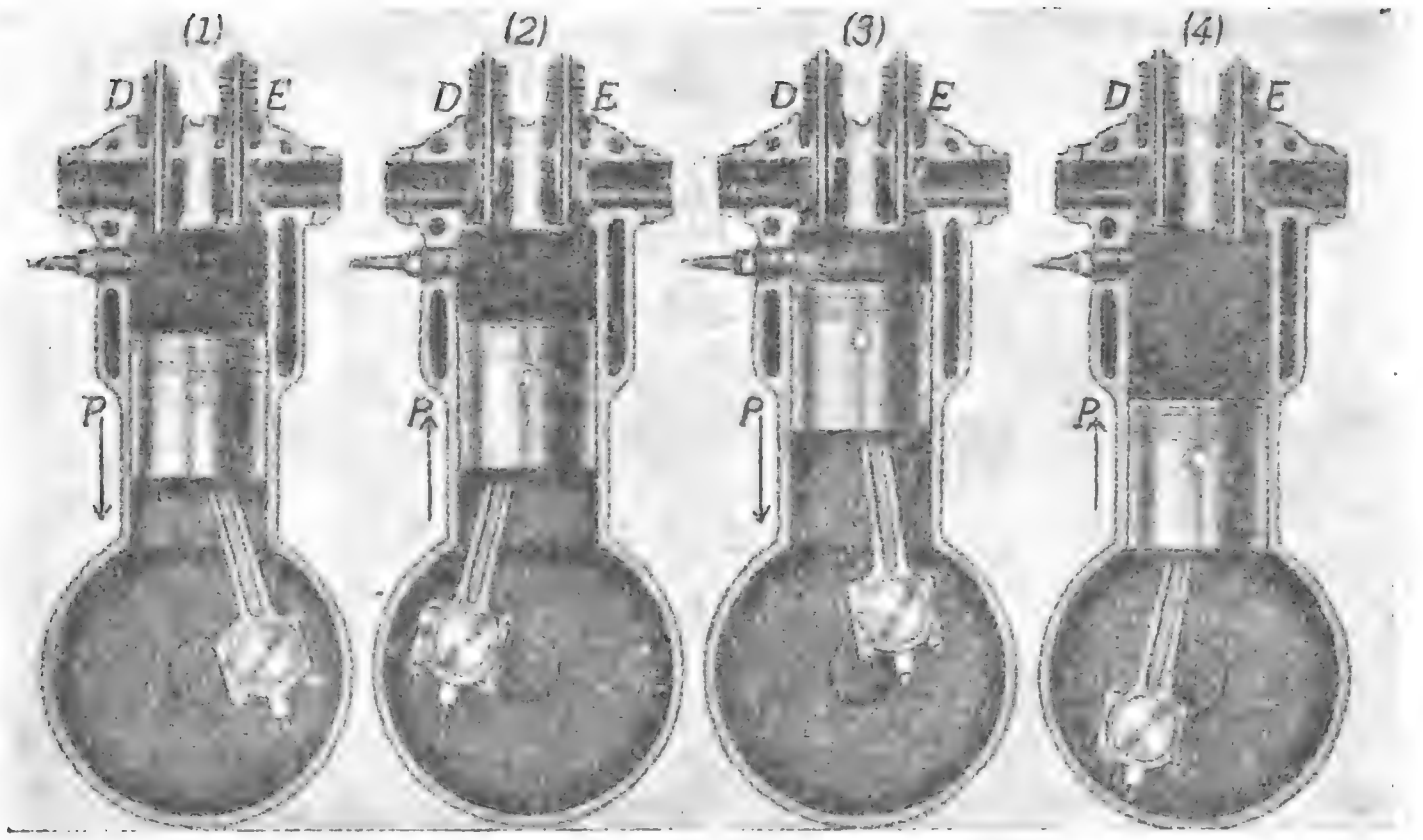
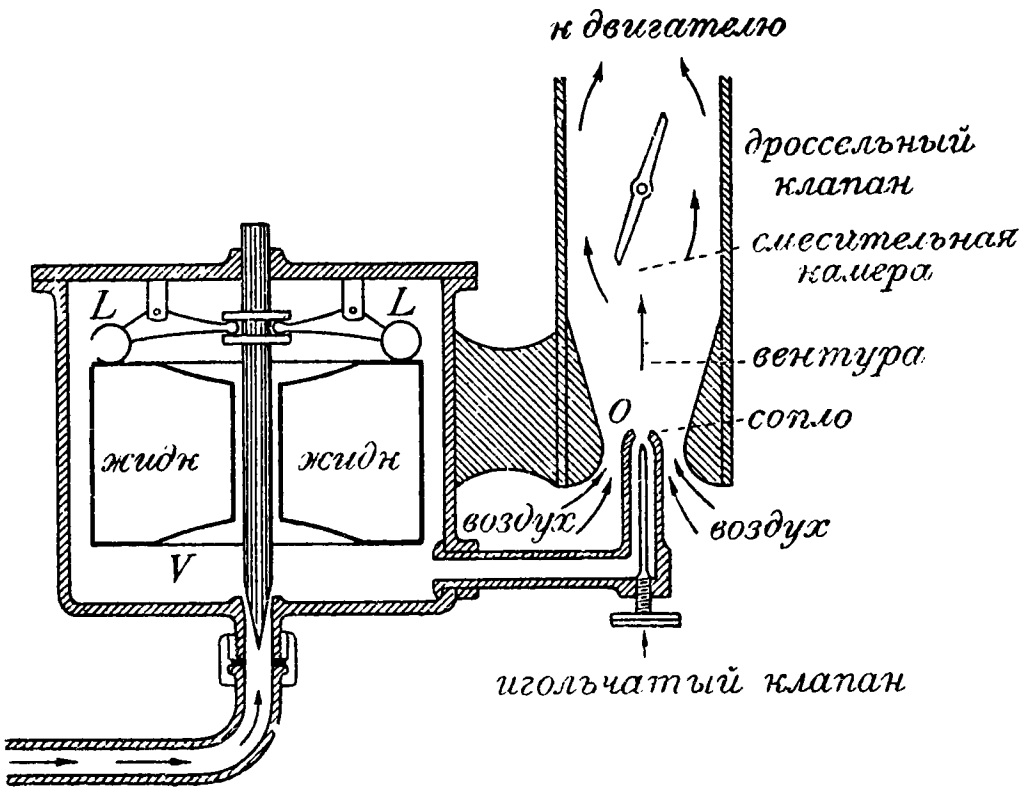


Рис. 184. Принцип газового двигателя.

желым, так чтобы энергия, полученная за время третьего хода поршня, заставляла машину двигаться с небольшой потерей скорости и в течение трех остальных частей цикла. Коэффициент полезного действия газового двигателя часто доходит до 30%, т. е. он превосходит коэффициент полезного действия лучших паровых двигателей. Кроме того, газовый двигатель не дает дыма, он очень компактный и может быть пущен в ход моментально. С другой стороны, горючее (газ или бензин) для него требуется сравнительно дорогое. Бóльшая часть автомобилей снабжены бензиновыми двигателями, главную роль тут играет легкость самих двигателей и необходимого для их питания бензина.



КАРБЮРАТОР.

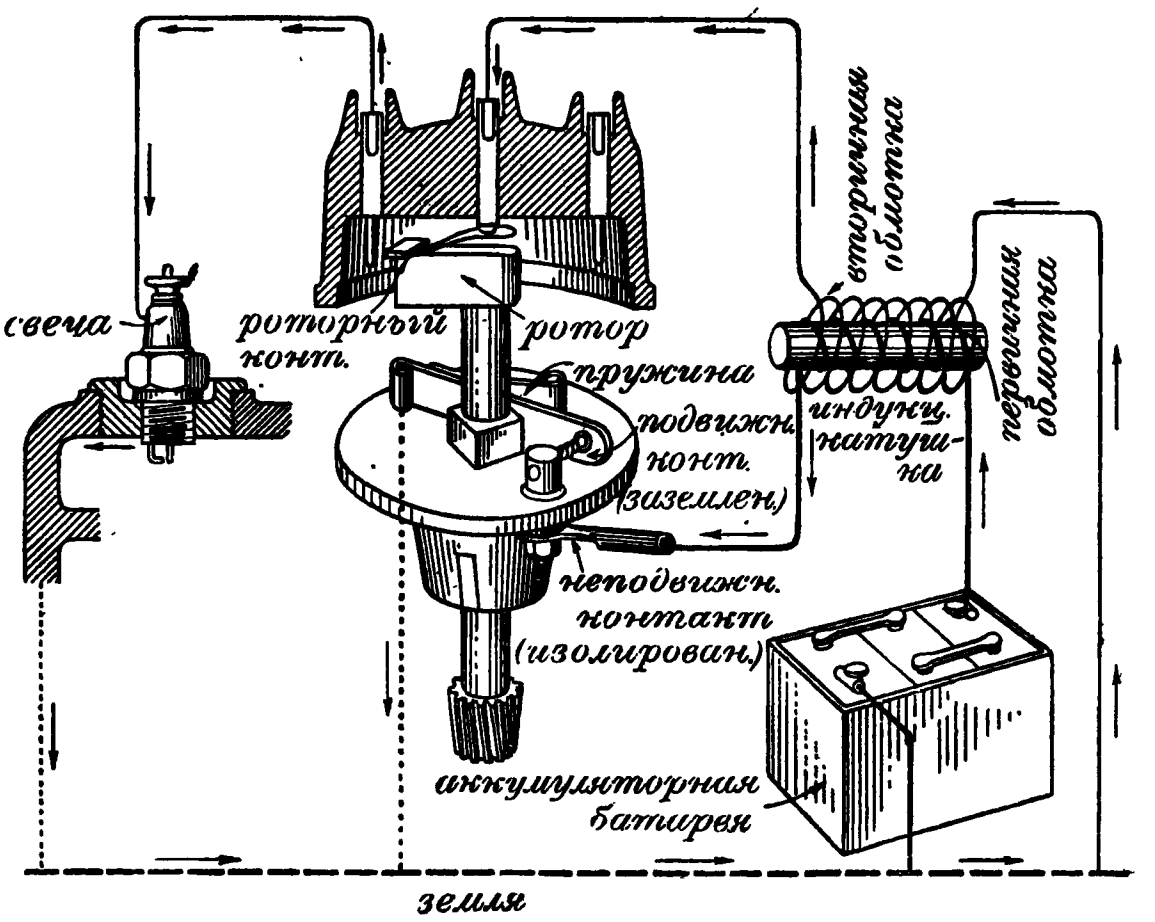
Только благодаря легкому и продуктивному газовому двигателю человеку удалось покорить воздушную стихию с помощью аэропланов и дирижаблей.

244. Автомобиль. На стр. 169 показаны главные механические части автомобиля и их соотношения. Цилиндры двигателей окружены водяными кожухами, составляющими части одной циркулирующей системы. Конвекционные потоки воды сообщают радиатору тепло, получаемое от двигателей; из радиатора благодаря потокам воздуха, производимым вращающимся вентилятором (10), тепло ухо-

дит в атмосферу. Если бы так или иначе газовый двигатель не охлаждался, он разогрелся бы до такой степени, что поршень застревал бы в цилиндре. Мощность двигателя передается задней оси посредством фрикционной муфты (11), трансмиссии (12) и дифференциальной зубчатой передачи.

245. Фрикционная муфта и трансмиссия. Так как газовый двигатель развивает свою мощность посредством ряда сильных взрывов, то ясно, что он, не в пример паровому двигателю, не может начать двигаться, уже будучи нагруженным. Поэтому, прежде чем пустить автомобиль, надо дать двигателю возможность достигнуть некоторой скорости, и, кроме того, мощность должна передаваться задней оси постепенно, посредством фрикционной муфты (11).

На заднем конце вала двигателя насажено маховое колесо, которое в коническ ой фрикционной муфте принимает коническую форму. Поблизости от него, но прикрепленная к валу трансмиссии, находится — соединительная тарелка. Это тяжелый диск, облицованный кожей, плотно пригнанный внутри махового колеса, в которое его вдавливает достаточно сильная пружина, не допускающая никаких скольжений диска. Шоффер выключает муфту, нажимая ногой рычаг.



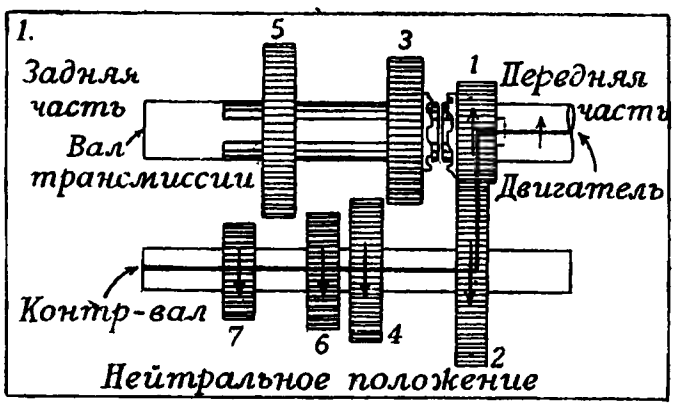
ЗАПАЛЬНАЯ СИСТЕМА.

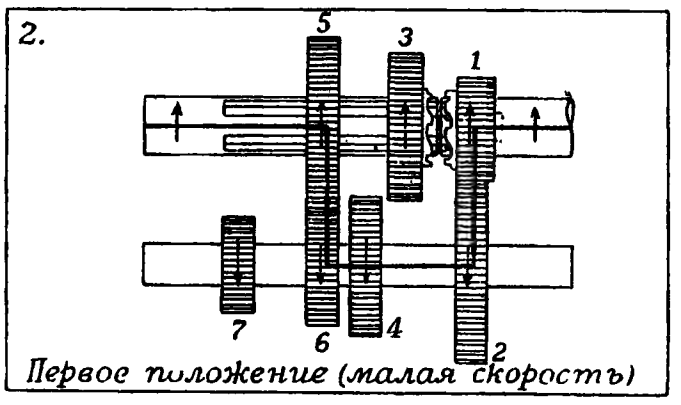
В дискообразной пластинчатой муфте (а это наиболее употребительный вид муфты) опорные поверхности суть две серии дисков: одна серия вращается вместе со стержнем двигателя, а другая — вместе с трансмиссией. Количество работы, производимое газовым двигателем в минуту, зависит от работы, совершаемой каждым взрывом, и от числа взрывов в минуту. Поэтому развить полную мощность такой двигатель может только при быстром вращении. Напр., при подъемах на гору двигатель должен работать быстро, хотя автомобиль сам движется сравнительно медленно.

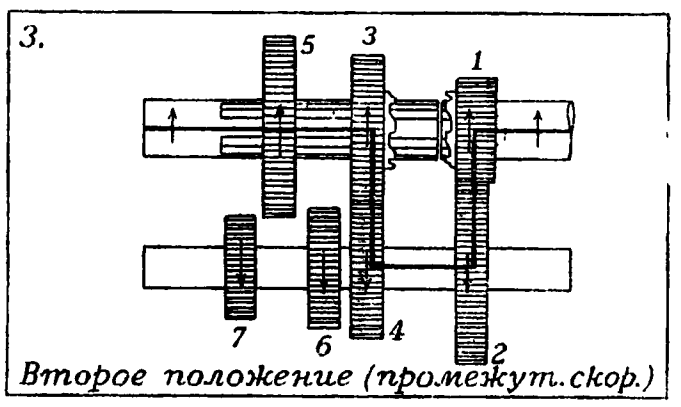
Целая система ходоуменьшителей, называемая трансмиссией (12 и рис. 185), употребляется, чтобы сделать число оборотов ведущего вала меньше числа оборотов коленчатого вала двигателя (4). На рис. 185 (1) зубчатые колеса находятся в нейтральном положении: (1) и (2) всегда друг против друга. Передаточный рычаг (14) заставляет зубчатые колеса 3 и 5 (рис. 185) скользить по поперечному валу. До перевода зубчатых колес муфта освобождается, чтобы отключить мощность мотора от ведущего вала. Чтобы избежать столкновения колес на вале трансмиссии с колесами на контр-вале, надо следить, чтобы они вращались, примерно, с одинаковой скоростью. На рис. 185 (2) показано соединение при малой скорости. При переходе ко второй скорости (рис. 185 (3)) муфта освобождается, зубчатое колесо 5 приводится в нейтральное положение, и, наконец, колесо 3 становится против 4. Только тогда муфте дают действовать. Переходя к полной скорости (рис. 185 (4)), колесо (3) через нейтральное положение доводят до соприкосновения с (1). Таким образом коленчатый вал двигателя непосредственно соединяется с ведущим валом, и оба они начинают вращаться с одинаковой скоростью. При заднем ходе (рис. 185 (5)) восьмое зубчатое колесо одновременно касается 5 и 7. Совершенно ясно, что вве-

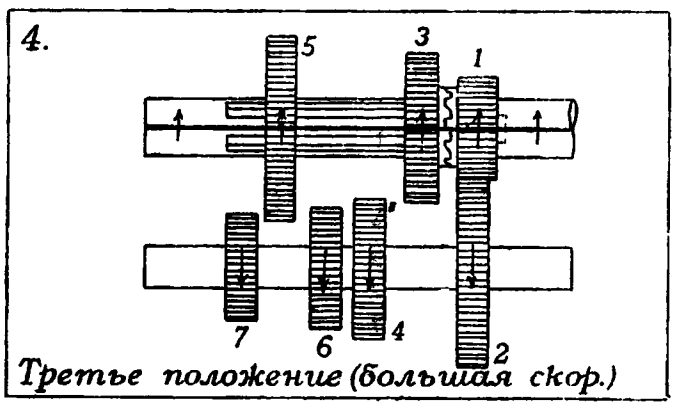
дение такого третьего колеса между колесами 5 и 7 изменяет направление вращения тягового вала на обратное.

246. Дифференциал. Автомобиль движется благодаря энергии, приложенной к его задней оси. Поэтому ось эта должна состоять из двух частей, а между ними должен быть д и ф ф е р е н ц и а л, для того чтобы при поворотах внешние колеса вращались быстрее внутренних. На большом рис. на стр. 169 и на рис. 186 показано, что шестерня, насаженная на ведущий вал, приводит во вращение главное косое зубчатое колесо B, к которому наглухо прикреплены дифференциальные зубчатые колеса 1 и 2. Левая ось непосредственно связана с колесом 3, а с главным косым зубчатым колесом B она связана через посредство колес 1 и 2. Пока автомобиль едет прямо, оба колеса вращаются с одинаковой скоростью. Поэтому в то время, как 3, 4, и B движутся с одинаковой скоростью, они увлекают за собой шестерни 1 и 2, не вращающиеся в этот момент вокруг своих подшипников. Когда автомобиль делает заворот, зубчатые колеса 3 и 4 вращаются с р а з л и ч н ы м и с к о р о с т я м и. Поэтому шестерни 1 и 2 не только увлекаются главным косым зубчатым колесом, но еще и вращаются в противоположную сторону вокруг своих подшипников.









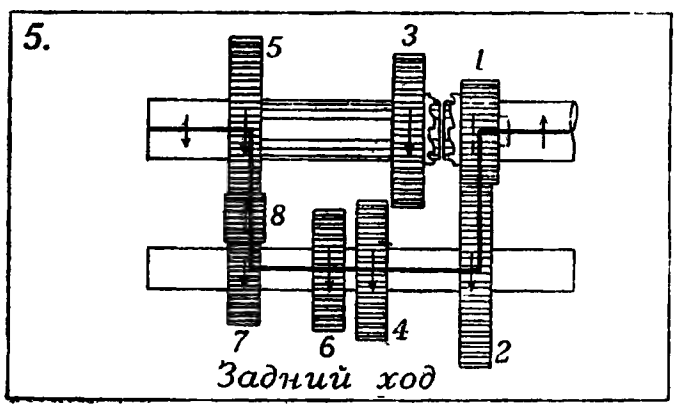


Рис. 185. Автомобильная трансмиссия.

247. Карбюратор. Карбюратор — это механизм, распыляющий жидкий газолин, керосин и т. п. и смешивающий их с воздухом в пропорции, необходимой для полного сгорания. Простой принцип устройства карбюратора показан на

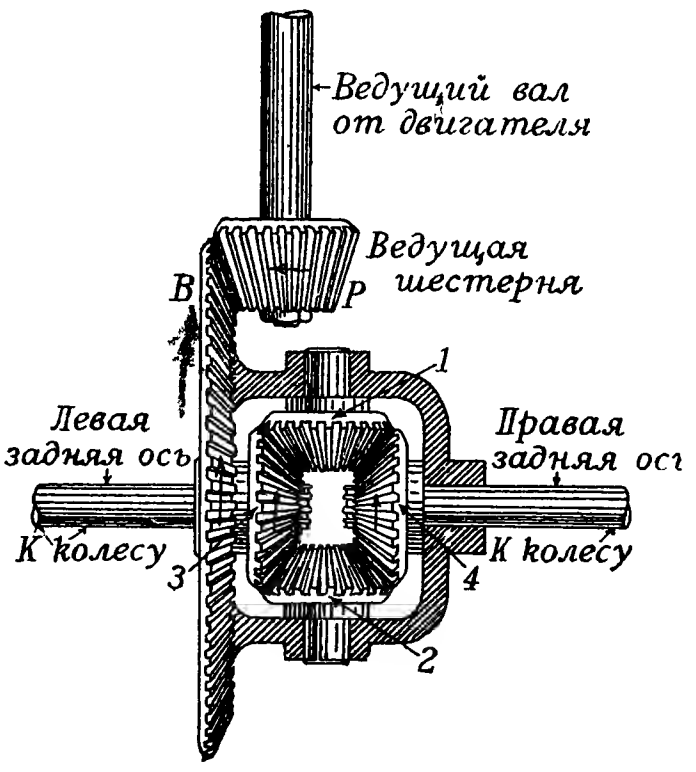


Рис. 186. Дифференциал.

чертеже на стр. 170. Жидкий бензин поступает через подающую трубу трубу и попадает в камеру для поплавка через клапан V. Действуя на рычаги L, поплавок закрывает клапан V, когда бензин достигает некоторого определенного уровня. Из камеры поплавка бензин поступает в сопло O. Во время работы двигателя движение поршней вниз при первом ходе (рис. 184) заставляет воздух быстро продвинуться мимо сопла в пространство, называемое venturi, где струя бензина выходит через O. Эта струя сме-

шивается с воздухом в смесительной камере и через выпускное отверстие попадает в двигатель в виде сильно взрывчатой смеси.

248. Запал. На чертеже на стр. 171 показано устройство зажигательной батареи, очень широко применяемой в автомобильной практике. От аккумуляторной батареи ток низкого напряжения (обычно от 6 до 8 вольт) проходит через первичную обмотку индукционной катушки, через подвижной контакт и оттуда через каркас автомобиля в батарею. Во время хода машины ротор (см. чертеж) последовательно соприкасается с 4 или больше зажимами, соединенными с 4 или больше свечами. Механизм устроен так, что в нужный момент, когда врывчатая смесь должна взорваться, а ротор соприкасается с нужным контактом, палец разъединяет заземленный подвижной контакт от неподвижного изолированного контакта. Таким образом размыкается ток в первичной цепи, и вследствие этого во вторичной цепи индукционной катушки возникает мгновенный ток высокого напряжения. В этот момент между зажимами всех свечей (рис. 184) проскакивают искры.

Число роторных контактов и свечей равно числу цилиндров двигателя.

Поршень делает один ход за время двух оборотов коленчатого вала. Поэтому коленчатый вал должен сделать 2 оборота, пока кулачный вал сделает один. Для этого, как показано на чертеже на стр. 169, коленчатый вал соединен с кулачным валом зубчатыми колесами, у которых отношение скоростей равно 2 к 1.

Взрывчатая смесь сгорает в течение очень короткого, но все же измеримого промежутка времени. Значит, взрыв достигает полной силы через некоторое короткое время после того, как искра зажигает смесь. Поэтому при больших скоростях искру надо пропускать при несколько более раннем положении поршня, чем при малых скоростях. Появление искры, обыкновенно, можно ускорить или замедлить, слегка поворачивая пластинку, к которой прикреплены неподвижные и подвижные контакты.

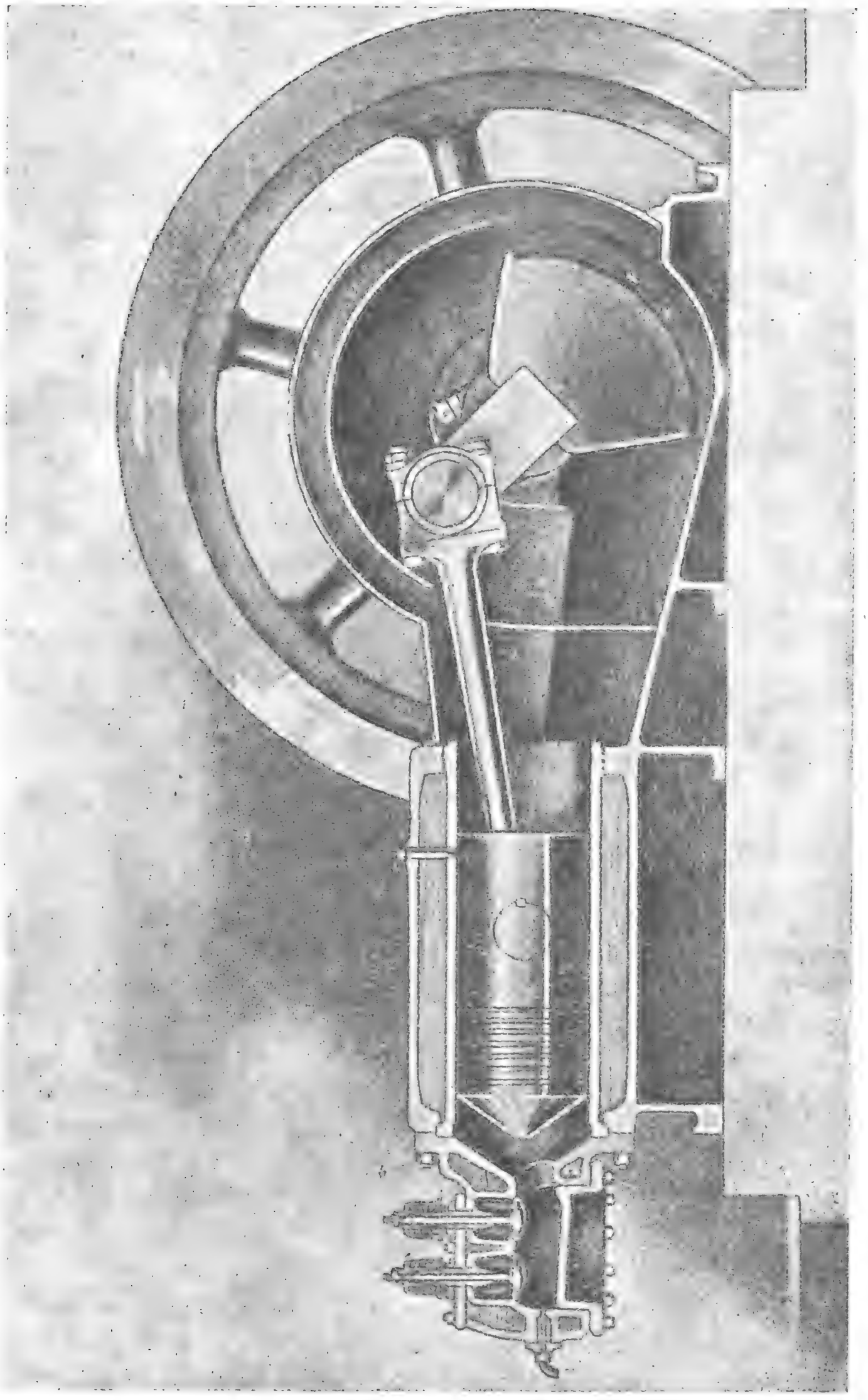
249. Дизель и полу-дизель. Двигатель Дизеля является одним из видов двигателей полного сгорания. В нем горючее воспламеняется за счет теплоты, развивающейся вследствие очень сильного сжатия воздуха внутри цилиндра. В этот сжатый и очень горячий воздух вводится струя горючего. Эта струя находится в течение первой части хода поршня под еще большим давлением, чем воздух. Горючее сгорает без взрывания и тем самым поддерживает практически постоянное давление в течение первой части хода поршня. Затем в течение остальной части хода поршня давление уменьшается.

В полу-дизеле (см. стр. 174) давление воздуха не достигает стольких *кг* на *кв. см*, как в полном дизеле, и сгорание горючего происходит в нем гораздо быстрее, до некоторой степени принимая характер взрыва. На рисунке показаны 2 клапана: воздушный клапан и выпускной клапан, расположенные непосредственно над небольшим пространством, называемым испарительной коробкой. Во время «всасывающего» хода поршня вправо весь цилиндр под влиянием внешнего давления наполняется воздухом через воздушный клапан. Этот воздух сжимается в испарительной коробке в течение обратного хода поршня. Около момента наибольшего сжатия в сильно нагретый воздух вталкивается распыленное горючее, оно воспламеняется, и взрыв вызывает новый ход поршня.

Двигатели полу-дизельного типа широко распространены, так как они надежны, просто устроены и соединяют в себе лучшие свойства и дизеля и газового двигателя.

Полный дизель более сложен, но и он тоже надежен, экономен и годится для самых разнообразных горючих — и для керосина, и

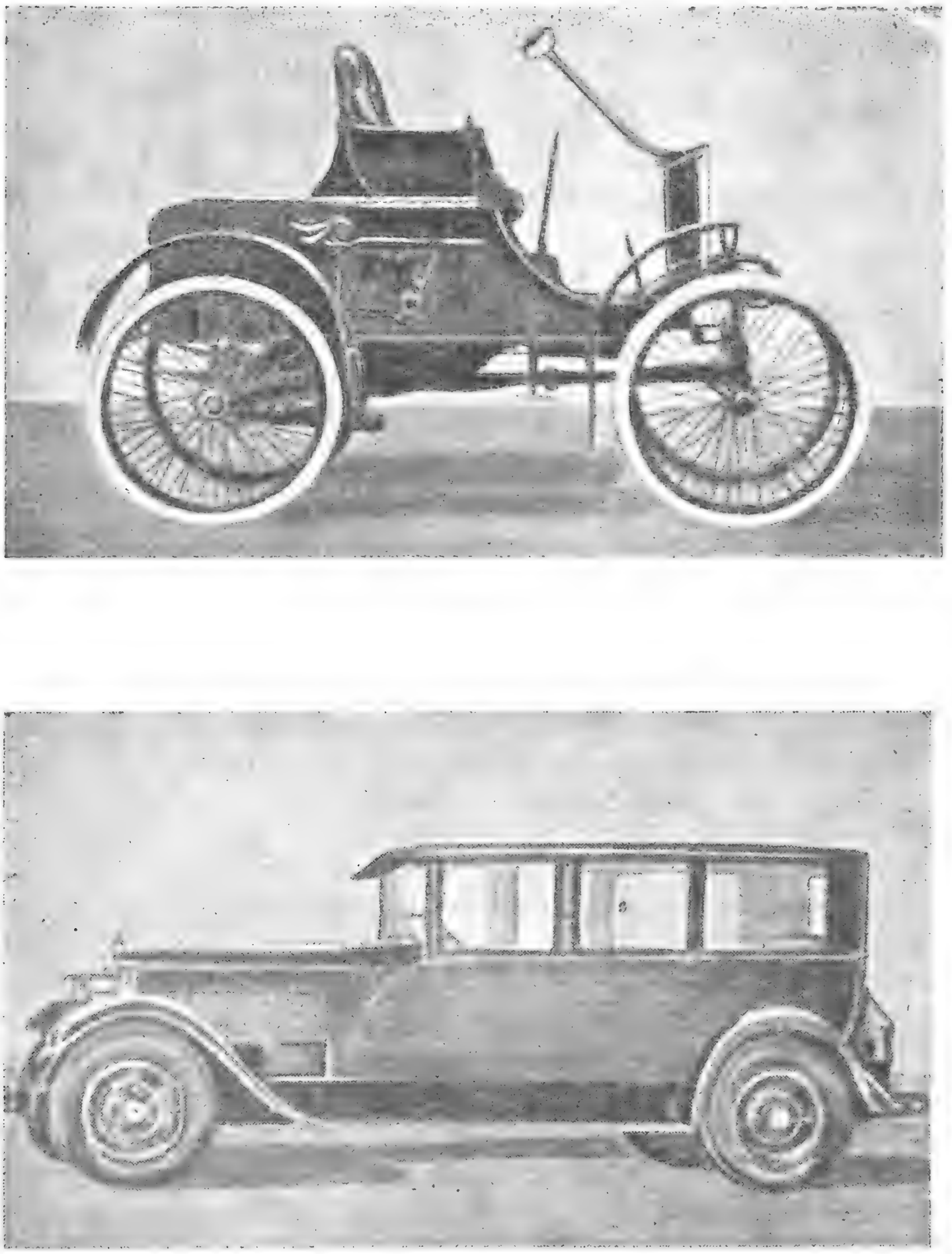
для тяжелых масел, вплоть до гудрона. Дизеля употребляют на подводных лодках, а также для самых различных сухопутных целей. Кроме того, они получают все большее и большее распространение на крупных торговых судах. Дизеля могли бы в широкой степени



ПОЛУ-ДИЗЕЛЬНЫЙ НЕФТЯНОЙ ДВИГАТЕЛЬ.

заменить паровые локомотивы, особенно для небольших составов и в безводных местностях. На «Грипсгольме», 23 500-тонном пароходе Шведско-Американской линии, установлено 2 полных дизеля, каждый из них делает 125 оборотов в минуту и развивает 17 000 л. с. Скорость «Грипсгольма» равна $17^{3}/_{4}$ узла.

Резюме. **В двигателях внутреннего сгорания необходимая для их работы теплота развивается внутри цилиндров, а не снаружи, как, напр., в паровой машине. Большое полезное действие их обусловлено очень высокой температурой внутри цилиндра.**



СТАРИННЫЙ И СОВРЕМЕННЫЙ АВТОМОБИЛЬ.

На верхнем рисунке виден типичный автомобиль 1899 г. Он имел одноцилиндровый двигатель, мощностью около 9 л. с., а основание колес было 180 *см*. Тяга была ремневая, а изменения скорости производились путем подтягивания ремня. На нижнем рисунке — современный лимузин на 7 человек, с 8 цилиндрами. Мощность двигателя — 80 л. с.

В четырехтактном газовом двигателе полный цикл состоит из всасывания, сжатия, взрыва и выпуска.

Главнейшие механические части автомобиля суть двигатель (включая сюда карбюратор, запальник и охлаждение), муфта, трансмиссия и дифференциал.

Вопросы и задачи.

1. Почему газовые двигатели называются двигателями внутреннего сгорания?

2. Для чего газовые двигатели снабжаются маховым колесом? Почему маховое колесо особенно необходимо одноцилиндровым стационарным газовым двигателям 4-тактного типа (каковые обычно употребляются, когда нужна небольшая мощность)?

3. Какое количество полезной работы совершил газолиновый двигатель, коэффициент полезного действия которого равен 25%, если за время работы он использовал 50 *кг* газолина, а каждый *г* газолина дает 9 072 калории.

4. Почему при подъеме автомобиля на гору вал кривошипа вращается быстро?

5. Предположим, что задние колеса автомобиля накрепко прикреплены к некоторой сплошной оси (без дифференциала). Как бы это повлияло на изнашивание задних шин при поворотах? Объясните.

ГЛАВА XI.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕПЛОТЫ.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ.

250. Теплопроводность твердых тел. Поместим один конец короткого металлического стержня в пламя бунзеновской горелки. Вскоре другой конец стержня нагреется так, что невозможно будет держать его в руках. Если же вместо металлического стержня проделать то же самое с деревянной или стеклянной палочкой, то конец, удаленный от пламени, не нагревается сколько-нибудь заметно.

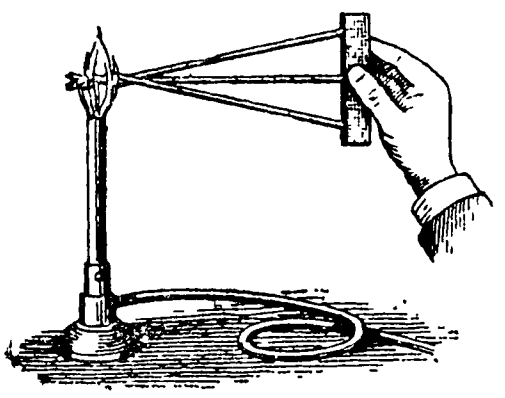


Рис. 187. Различная теплопроводность металлов.

Этот и подобные ему опыты показывают, что неметаллические вещества обладают гораздо меньшей способностью проводить теплоту, чем металлические. По сравнению с неметаллическими веществами, все металлы являются хорошими проводниками теплоты; но различные металлы сильно отличаются друг от друга по своей теплопроводности.

Скрутим вместе концы трех проволочек одинаковых размеров (диаметр — 3 *мм*, а длина — 50 *см*), но сделанных из трех различных металлов: меди, железа и нейзильбера (см. рис. 187). Скрученные концы поместим в пламя бунзеновской горелки. Затем медленно будем двигать спичку по очереди вдоль каждой проволочки, начиная с холодного конца к горячему, и заметим, в каком месте проволочка окажется настолько нагрета, что спичка воспламенится. Мы убедимся таким образом, что из этих трех металлов медь — лучший проводник, а нейзильбер — худший.

В следующей таблице несколько общеупотребительных веществ расположены по их теплопроводностям.

Измерения теплопроводностей производились по методу, не отличающемуся по идее от только что описанного.

Для удобства теплопроводность серебра принята равной 100.

Серебро	100	Нейзильбер	6,3
Медь	74	Ртуть	1,5
Алюминий	48	Лед	0,21
Латунь	27	Стекло	0,15
Цинк	15	Каучук	0,04
Свинец	8,5		

251. Теплопроводность жидкостей и газов. В пробирку, наполненную ледяной водой, бросим маленький кусочек льда и будем придерживать его стеклянной палочкой на дне пробирки. Будем затем нагревать верхнюю часть пробирки на бунзеновской горелке (рис. 188). Верхние слои воды можно довести до кипения, а лед при этом не растает. Очевидно, вода является очень плохим проводником теплоты. Это можно показать еще яснее на следующем опыте: поместим шарик воздушного термометра на несколько миллиметров ниже уровня воды в большой воронке, как показано на рис. 189. Нальем теперь на воду ложку эфира и зажжем его. Несмотря на большую чувствительность воздушного термометра к изменениям температуры, показание его при этом почти что совершенно не изменится.

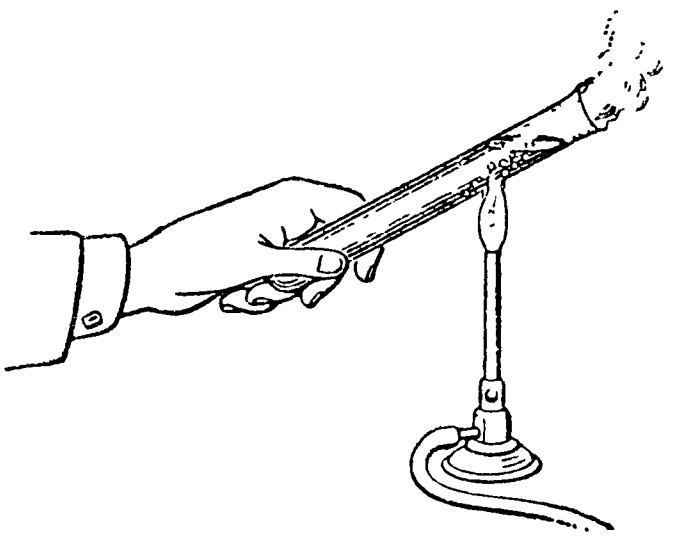


Рис. 188. Вода не проводит тепла.

Тщательные измерения теплопроводности воды показали, что она равна только около $^1/_{1200}$ теплопроводности серебра. Теплопроводность газов еще меньше: в среднем она не больше $^1/_{25}$ теплопроводности воды.

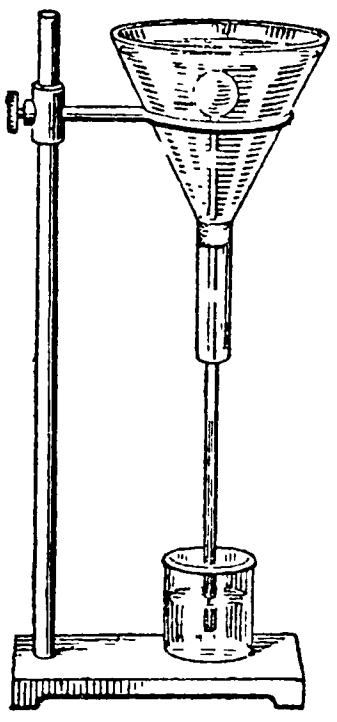


Рис. 189. Сжигание эфира на воде не влияет на показание воздушного термометра.

252. Теплопроводность и ощущение. В холодный, зимний день кусок металла, как известно, кажется на ощупь куда холоднее, чем кусок дерева. А между тем—температура металла и дерева должна быть одинаковая. Известно также, что если в летнюю жару кусок металла и кусок дерева полежат на ярком солнце, то кусок дерева можно будет спокойно взять в руки, а кусок металла раскалится так, что можно обжечься. Объясняются эти явления так: железо, будучи гораздо лучшим проводником теплоты, чем дерево, зимою гораздо быстрее отнимает от руки теплоту, а летом гораздо быстрее отдает его руке. Вообще, чем лучше проводник, тем холоднее он покажется руке, которая сама теплее его, — и тем горячее руке, — которая сама холоднее проводника.

Так, напр., в холодной комнате клеенка — довольно хороший проводник — кажется на ощупь гораздо холоднее, чем ковер, являющийся сравнительно плохим проводником. По этой же причине полотняные ткани зимою кажутся на ощупь холоднее шерстяных.

253. Роль воздуха в непроводниках. Перья, мех, войлок и т. п. являются очень теплыми покровами, потому что они очень плохо проводят теплоту и, благодаря этому, не пропускают наружу теплоту нашего тела. Их плохая теплопроводность объясняется главным

образом тем, что в них находится множество мелких промежутков, заполненных воздухом. А газы, как известно, самые лучшие непроводники теплоты. Вот почему свеже-выпавший снег так хорошо предохраняеет растительность от морозов. Фермеры, при внезапном наступлении зимних холодов, всегда боятся за свои фруктовые сады и виноградники, если только земля не оделась еще снежным покровом, препятствующим глубокому промерзанию почвы. Плохой теплопроводностью воздуха пользуются и при устройстве покрытия для паропроводов: их делают ячеистыми (см. рис. 190).

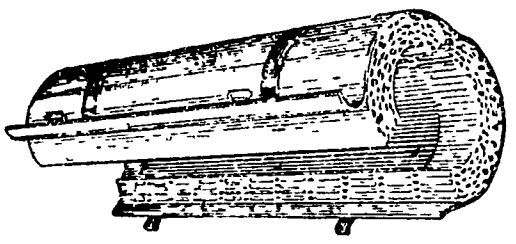


Рис. 190. Покрышка паровых труб.

254. Лампа Дэви. Поместим над струей газа из горелки кусок медной проволочной сетки. Поднесем горящую спичку к струе газа над сеткой. Мы увидим, что над сеткой появится пламя (рис. 191, I), но оно не распространится вниз, под сетку. Если поджечь газ под сеткой, пламя не пройдет вверх через сетку, а будет иметь вид, как на рис. 191 (2).

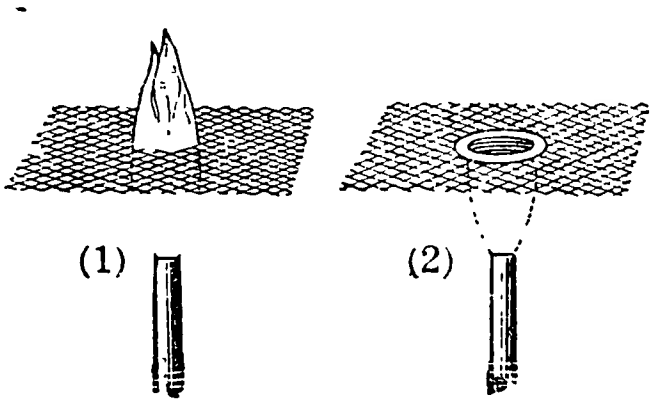


Рис. 191. Пламя не проходит сквозь проволочную сетку.

Объясняется это очень просто. Теплота пламени так быстро уходит по медной сетке, что по другую сторону сетки температура газа не поднимается до температуры горения.

В рудниках и шахтах употребляются безопасные лампы, целиком закрытые проволочной сеткой, так называемые лампы Дэви. Таким образом, если даже шахта полна разными легко воспламеняющимися газами, все же можно зажечь там лампу Дэви, так как пламя благодаря сетке не выходит за пределы лампы.

Резюме. **Металлы являются лучшими проводниками теплоты, а газы — худшими.**

Из двух одинаково горячих тел лучший проводник кажется на ощупь горячее. Из двух одинаково холодных тел — лучший проводник кажется на ощупь холоднее. Плохая теплопроводность рыхлых тел объясняется главным образом присутствием в них воздуха. Один из лучших примеров таких тел — это силоксикон (инфузорная земля).

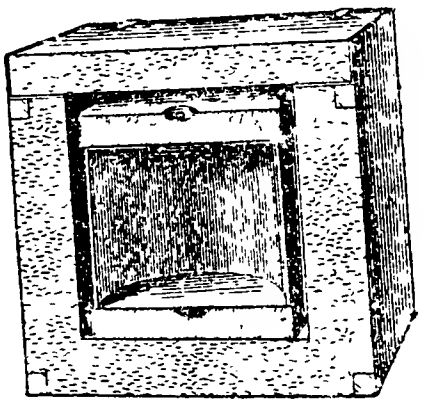


Рис. 192. Плита для готовки без огня

Вопросы и задачи.

1. Что будет со льдом, находящимся в холодильнике, если завернуть его в шерстяное одеяло? Как это отразится на холодильнике?

2. Почему пожарные всегда носят фланелевые рубашки: летом, чтобы не было жарко, а зимой—чтобы не было холодно?

3. На рис. 192 изображена плита, на которой можно готовить без огня. Объясните по этому рисунку, на каком принципе основано приготовление пищи без огня?

4. Почему в холодный зимний день мокрый палец или язык моментально примерзает к куску железа и не примерзает к куску дерева.

5. Почему в мороженице внешнее ведерце — толстое и деревянное, а внутреннее — тонкое, металлическое?

6. Дает ли нам наша одежда тепло? Почему же она нас согревает?

7. Почему трубы, по которым при первом отоплении идет пар из котла в радиаторы, часто покрывают азбестом, имеющим ячеистое строение? В чем преимущество такого строения?

КОНВЕКЦИЯ.

255. Конвекция в жидкостях. Опыт § 251 показал, что теплопроводность жидкостей очень мала. И все же они, при некоторых условиях, могут переносить теплоту гораздо лучше, чем твердые тела. Так, напр., если бы в опыте, изображенном на рис. 188, лед был сверху, а нагревали бы мы пробирку снизу, лед растаял бы очень быстро. Это показывает, что теплота гораздо быстрее передается от дна пробирки кверху, чем сверху до дна пробирки.

Следующий опыт поясняет самый механизм распространения теплоты через жидкости. Колбу с выпуклым дном (рис. 193) наполним до половины водой и бросим туда несколько кусочков фуксина или какой-нибудь другой краски, растворяющейся в воде. Затем будем подогревать дно колбы на пламени бунзеновской горелки Благодаря присутствию краски мы увидим, что в воде при этом образуются потоки: вверх — непосредственно над пламенем и вниз — по бокам сосуда. Через короткое время вся вода окрасится в однородный цвет. Это показывает, как основательно перемешивается жидкость при нагревании.

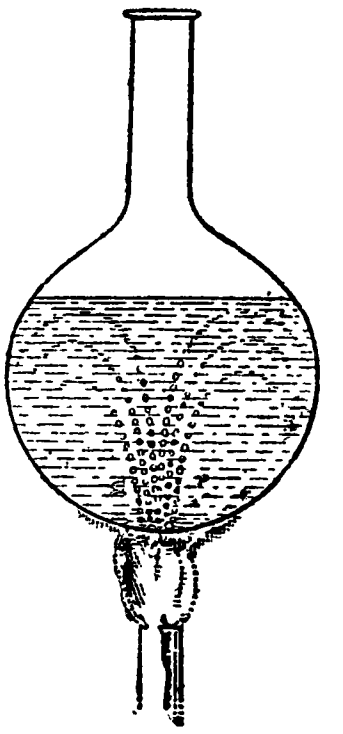


Рис. 193. Конвекционные потоки.

Это явление объясняется следующим образом: слои воды, ближайшие к пламени, нагрелись и расширились. Понятно, что при этом они стали менее плотными, чем окружающая вода. И холодные, более плотные слои воды по бокам сосуда выталкивают своим давлением эти менее плотные слои и сами занимают их место. Ясно, что таким образом тепло может передаваться только через жидкости. Основное различие между такой передачей тепла и теплопроводностью состоит в том, что здесь теплота не передается от молекулы к молекуле через всю массу жидкости, — она, скорее, передается посредством перехода довольно больших масс нагретой жидкости из одной точки в другую. Этот способ передачи тепла называется к о н в е к ц и е й.

256. Ветры и океанские течения. Ветры — это попросту конвекционные токи в атмосфере, вызванные неравномерным нагреванием земли солнечными лучами. Вспомним, например, морские бризы, хорошо знакомые всякому жителю прибрежных стран. В течение дня суша нагревается скорее, чем вода, потому что теплоемкость воды гораздо больше теплоемкости суши. Поэтому воздух над сушей нагревается и расширяется. Над морем воздух холоднее и плотнее. Поэтому он выталкивает нагретый над сушей воздух и сам переходит на его место. Таким образом порождаются морские бризы, дующие в течение дня и, обычно, достигающие наибольшей силы после полудня. Ночью земля остывает быстрее моря; поэтому направление ветра — обратное. Эти бризы редко чувствуются на расстоянии свыше 16 *км* от моря. Океанские течения частью вызываются неравномерным на-

гревáнием моря, частью направлением господствующих ветров. Большей частью и ветры и течения так сильно зависят от очертания берегов, что предсказать направление ветров и течений с помощью только что изложенных простых соображений можно только на очень больших океанских просторах.

ИЗЛУЧЕНИЕ.

257. Третий способ распространения теплоты. Есть некоторые явления, связанные с распространением теплоты, которые нельзя объяснить ни теплопроводностью, ни конвекцией. Например. Человек сидит у камина. Он ощущает тепло. Эта теплота не может передаваться ему от огня конвекцией, так как потоки воздуха направлены к огню, а не от огня. Не может она передаваться и теплопроводностью, так как теплопроводность воздуха чрезвычайно мала и потоков холодного воздуха, движущихся к огню, более чем достаточно, чтобы нейтрализовать всякий переход теплоты от огня к человеку. Отсюда ясно, что кроме теплопроводности и конвекции, должен существовать еще один способ перехода теплоты через промежуточные среду.

Это становится еще яснее, если вспомнить, каким образом земля получает теплоту от солнца. Теплопроводность и конвекция переносят теплоту только через материю. А пространство между землей и солнцем не заполнено обыкновенной материей: иначе движение земли в пространстве все время замедлялось бы. Значит, есть еще какой-то третий способ распространения теплоты. Этот третий способ называется и з л у ч е н и е м. Примеры излучения: переход теплоты от огня к человеку, сидящему перед камином, и от солнца к земле.

258. Природа излучения. Природа излучения будет более подробно разобрана в главе XXI. Здесь достаточно обратить внимание на следующие различия между теплопроводностью, конвекцией и излучением.

П е р в о е. Теплопроводность и конвекция — процессы, сравнительно, медленные. Распространение теплоты посредством излучения происходит с огромной скоростью, равной скорости света, т. е. 300 000 *км* в сек. Равенство этих скоростей явствует из следующего явления: во время солнечного затмения луна начинает заслонять от нас тепловые лучи солнца точно в тот же момент, что и солнечный свет.

В т о р о е. Излученная теплота движется по прямым линиям, в то время как теплота, распространяющаяся конвекцией или теплопроводностью, может итти по самым замысловатым путям. Для доказательства достаточно вспомнить, что от излучения всякое тело можно отгородить экраном, поставленным между источником теплоты и телом.

Т р е т ь е. Излученная теплота может проходить через среду, не нагревая ее. Так, напр., верхние слои атмосферы — даже в самые жаркие летние дни — очень холодные; или, напр., сами парники нагреваются гораздо сильнее, чем стекло, через которое солнечные лучи в них проникают.

259. Сосуд Дюара и термос. Для хранения исключительно холод-

ных жидкостей, как, напр., жидкий воздух, который закипает при —180° С, Дюар придумал особый вид сосудов с двойными стенками. Между стенками находится пустота; а внутренняя поверхность внешнего сосуда и внешняя поверхность внутреннего сосуда посеребрены. Есть только три способа, которыми наружное тепло может проникнуть внутрь сосуда: это — теплопроводность, конвекция и излучение. Пустота между стенками почти совершенно исключает первые два способа; а серебрение сильно уменьшает переход теплоты благодаря излучению. На рис. 194 изображена стеклянная внутренняя часть обыкновенного термоса. Это, как видите, просто цилиндрический сосуд Дюара, в котором холодная жидкость остается холодной, а горячая — горячей: двойные стенки так же затрудняют переход теплоты из сосуда наружу, как и снаружи в сосуд. Стеклянный сосуд снабжен пробкой и защищен крепким металлическим футляром. Температура горячих и холодных жидкостей, сохраняемых в термосе, за несколько часов изменяется всего на несколько градусов.

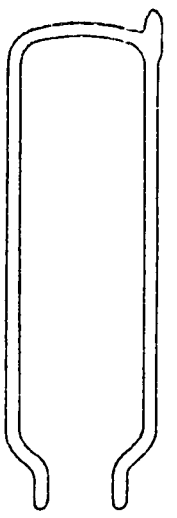


Рис. 194. Внутренний стеклянный сосуд термоса.

ОТОПЛЕНИЕ И ВЕНТИЛЯЦИЯ ЗДАНИЯ.

260. Принцип вентиляции. Отопление и вентиляция зданий осуществляются главным образом благодаря конвекции.

Принцип вентиляции очень ясно виден на следующем опыте: зажжем свечу и поместим ее в сосуд, дно которого покрыто тонким слоем воды (рис. 195). Над свечой поставим стекло от лампы, так, чтобы низ его был под водой. Пламя начнет медленно гаснуть и наконец погаснет совсем. Произойдет это потому, что необходимый для горения кислород постепенно используется, а приток новых порций кислорода — при такой постановке опыта — не может происходить. Если чуть-чуть приподнять стекло над водой, угасающее пламя сразу сделается ярче. Почему? Если сделать в стекле металлическую или картонную перегородку (как показано на рис. 195), пламя не будет гаснуть, даже когда стекло опущено в воду.

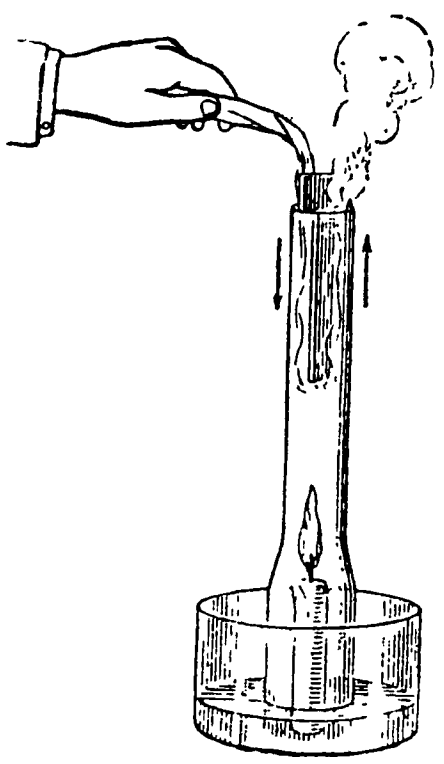


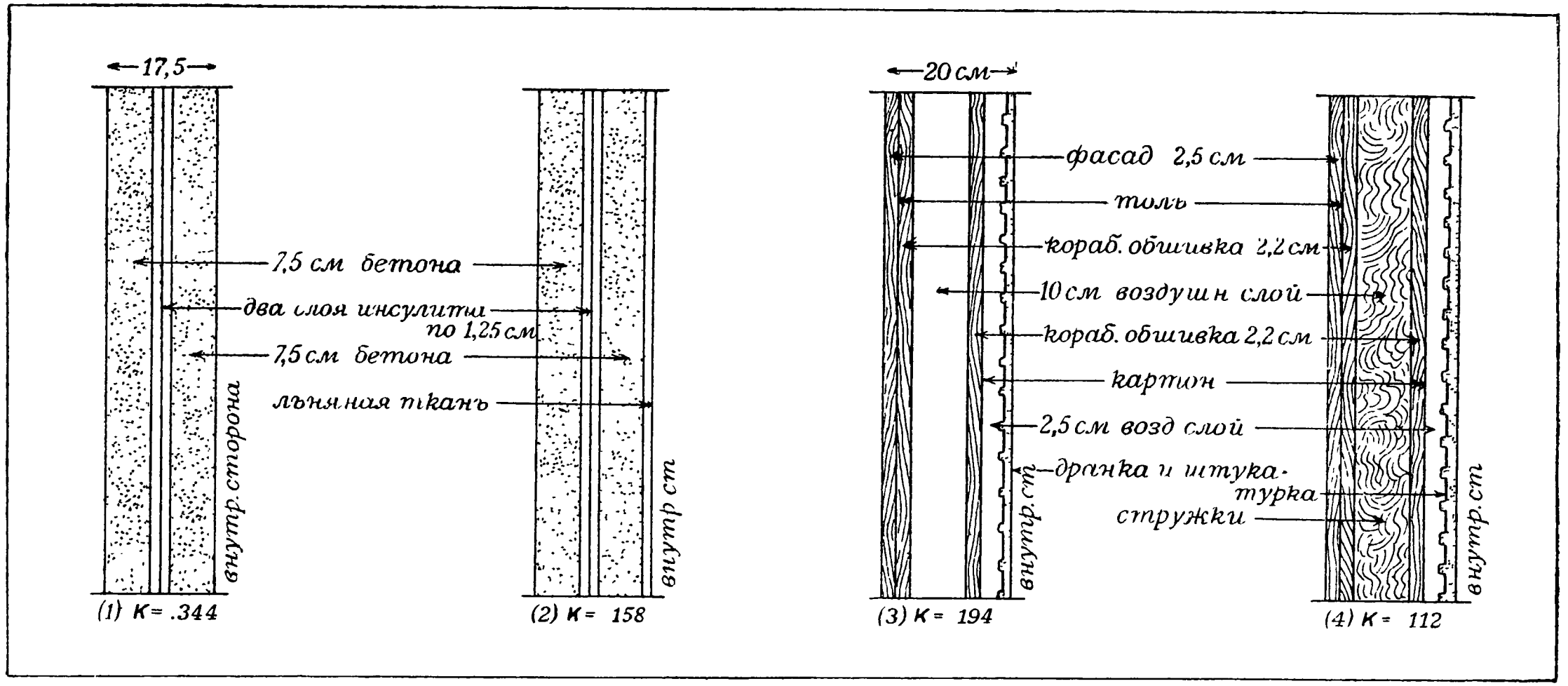
Рис. 195. Конвекционные потоки в воздухе.

Причину всех этих явлений легко понять, если держать над стеклом кусочек горящей пробной бумаги (промокательной бумаги, пропитанной раствором калийной селитры и затем высушенной.)

Дым укажет направление потоков воздуха. (Если делать опыты с большим ламповым стеклом, то для удачи первого опыта лучше пользоваться двумя свечками: иначе площадь нагрева будет слишком мала, и по бокам стекла смогут образоваться нисходящие потоки.) Вместо бумаги можно пользоваться спиральной трубкой из глазированной бумаги, диаметром в 6 *мм*.

261. Вентиляция домов. Для удовлетворительной вентиляции комнаты считается, что на каждого живущего ежечасно должно поступать 0,03 *куб. м* свежего воздуха (газовая горелка в смысле поглощения кислорода равносильна четырем человекам). Потоки воздуха, движущиеся едва заметно, все же имеют скорости около 1 *м* в сек.

Следовательно, если впускать свежий воздух с такой скоростью, т
на каждого человека нужно отверстие площадью, примерно, в 150—
180 *кв. см.* В зависимости от различных способов отопления жилы



ТЕПЛОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЙ.

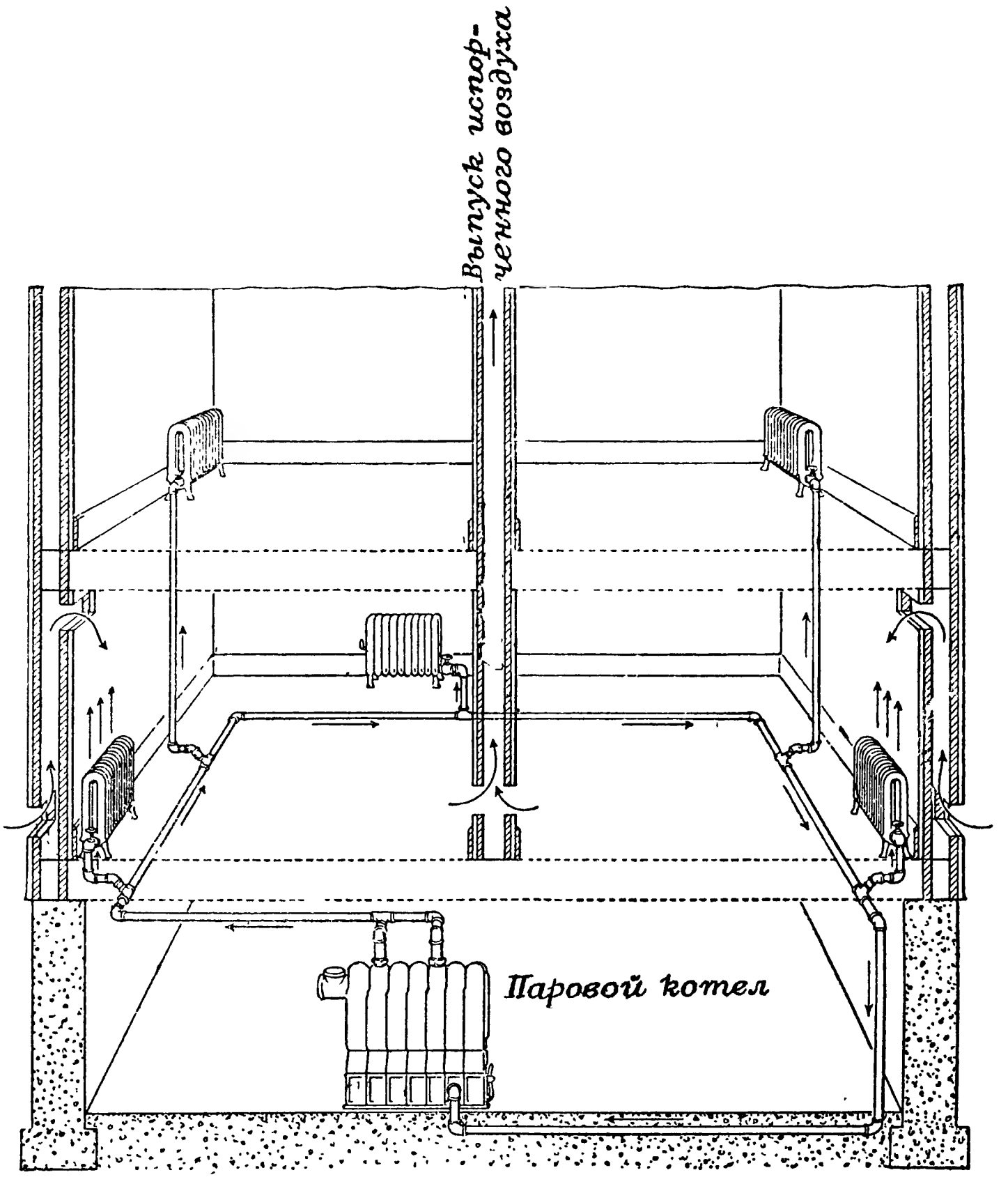
Рассчитано, что в год одни только САСШ экономили бы по крайней мере 100 000 000 долларов на топливо, если бы стены домов служили достаточной тепловой изоляцией. Такие стены сохраняли бы тепло в холодном климате и не пропускали бы его в дома — в жарком. Факты, иллюстрируемые в этой таблице, суть результаты опытов, проведенных в университете в Саскачеване (с помощью маленьких безоконных опытных домов) над теплопроводностью различных стен. K — пропорционально теплопроводности, и в употреблявшихся единицах теплопроводность K твердой цементированной стены толщиной в 16 *см* была = 0,782. Сравнивая значение L, видим, что стены (2) и (4), стоящие не на много дороже (1) и (3), требуют почти вдвое меньше топлива для поддержания постоянной температуры. Принимая теплопроводность твердого цемента за сто, мы находим, что потеря тепла через (1) равна 44% потери через твердый цемент; через (2)—20%, через (3)—25%, через (4)—14%.

домов и подача этого необходимого запаса свежего воздуха тоже происходит различным образом (см. стр. 183).

Если дом отапливается печами или каминами, — не требуется никаких особых приспособлений для вентиляции. Под давлением свежего воздуха, проникающего через скважины в дверях и окнах

или через стены, если они достаточно пористые, испорченный воздух вместе с дымом уходит в трубу.

262. Воздушное отопление. В домах, отапливаемых горячим воздухом, обыкновенно имеется специальный трубопровод для впуска свежего



СИСТЕМА ВЕНТИЛЯЦИИ И ПАРОВОГО ОТОПЛЕНИЯ ДОМА.

Чертеж изображает устройство простого парового отопления. Пар из верхней части котла идет в трубу, имеющую всюду легкий наклон вниз. По ответвлениям пар проходит в отдельные радиаторы, сгущается там и возвращается по трубе в подвал и оттуда в нижнюю часть котла. Возвращающаяся вода занимает, примерно, $^1/_{1600}$ объема пара. Ясно, что одной трубы на каждый радиатор достаточно и для впуска пара и выпуска воды. Вентиляция достигается, как показано на рисунке, отверстиями в стене над радиаторами; через них входит свежий воздух. Поднимающийся от радиаторов теплый воздух не дает холодному воздуху опуститься на пол. Испорченный воздух выходит через другие отверстия, расположенные около пола на другом конце комнаты, и оттуда уходит кверху по специальному ходу. Это показано в нижней части рисунка.

воздуха (см. рис. 196) (впуск холодного воздуха). Этот поступающий снаружи холодный воздух нагревается, обходя по спиральной линии (как показано

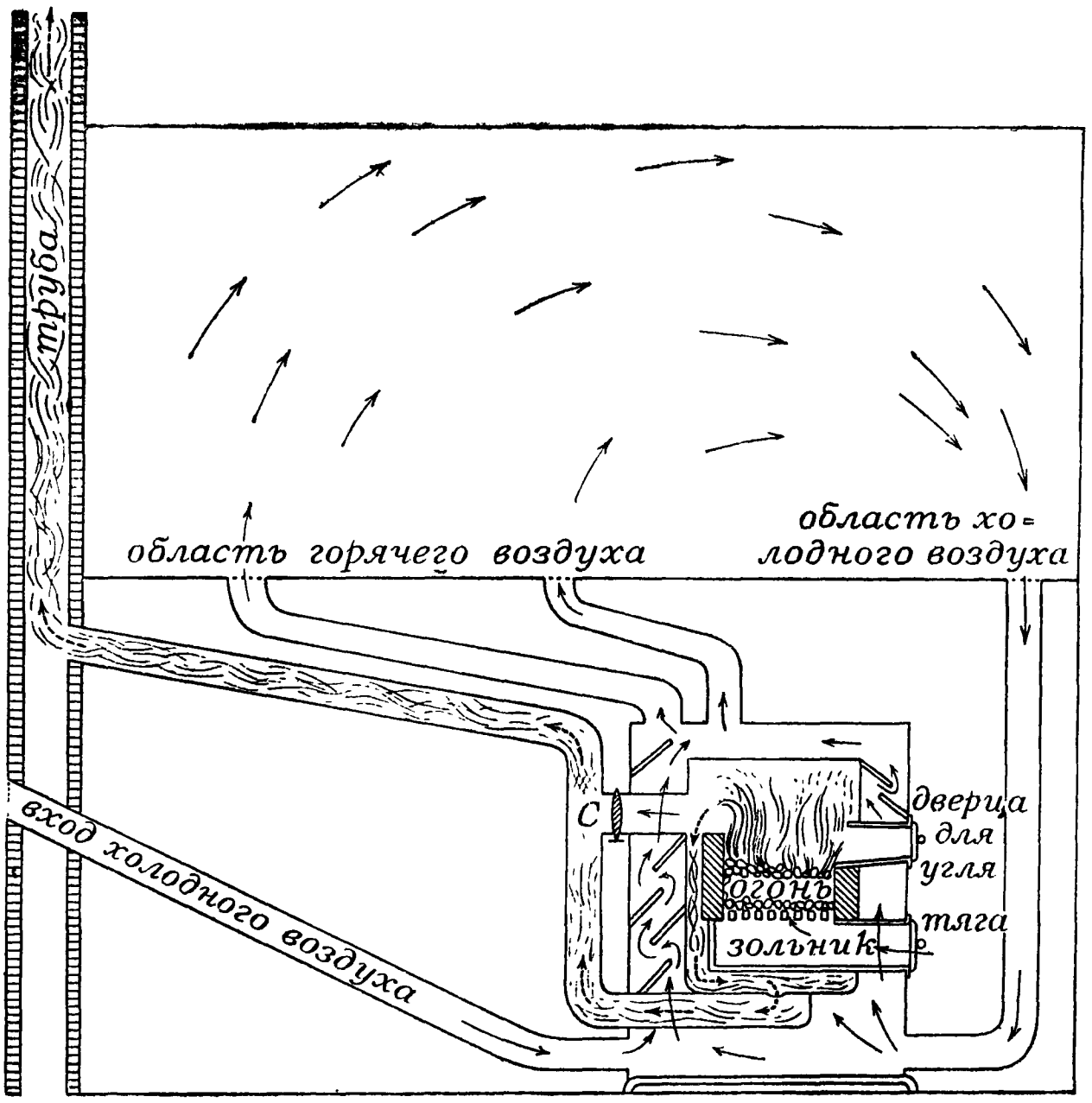


Рис. 196. Отопление горячим воздухом.

на рис. 197) вокруг внешнего железного кожуха печи. Затем уже горячий воздух поступает в комнаты. Отсюда часть его уходит через окна и двери, и оставшаяся часть по специальным трубам возвращается в печь, где она снова нагревается вместе с пришедшими снаружи новыми запасами холодного воздуха.

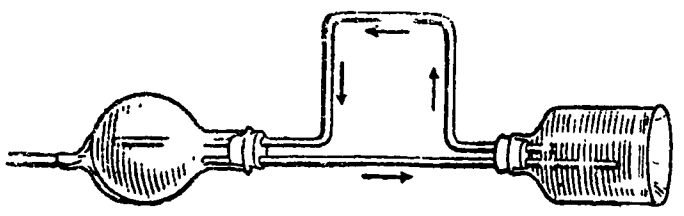


Рис. 197. Принцип отопления горячей водой.

Когда зажигают печь, выгодно в первые моменты иметь более сильную тягу. Для этого открывают C, чтобы дым попадал прямо в трубу. Когда печь разгорается, заслонку C закрывают, и дым вместе с горячими газами из печи должен проделывать кружный путь, указанный стрелками. За время этого пути дым и горячие газы отдают большую часть своего тепла стальным стенкам кожуха, а они уже в свою очередь передают тепло воздуху, идущему в жилые комнаты.

263. Паровое и водяное отопление. Для иллюстрации принципа водяного отопления может послужить прибор, изображенный на рис. 197. Наполним верхний сосуд подкрашенной водой и будем нагревать нижний сосуд. Благодаря подкрашенной воде мы увидим, что потоки воды движутся в направлении, указанном стрелками.

На том же самом принципе основан газовый змеевик, с помощью которого нагревают кипятильники (рис. 198). Тепло от газового пламени переходит по медному змеевику в воду. Начинается конвекция, показанная стрелками. Когда с верхнего конца в кипятильник вливается горячая вода, то холодная вода входит с нижнего конца, около дна, так, чтобы она не смешивалась с горячей водой, уже бывшей в употреблении.

Этот же принцип лежит в основе устройства охлаждения автомобильных двигателей, без которого они могли бы перегреться. Тепло из двигателя пере-

ходит в воду; а вода теряет это тепло, циркулируя вокруг змеевика радиатора (см. стр. 169).

На рис. 199 изображено устройство котла и радиаторов в одной из систем водяного отопления. Вода, нагреваемая в печи, поднимается прямо по

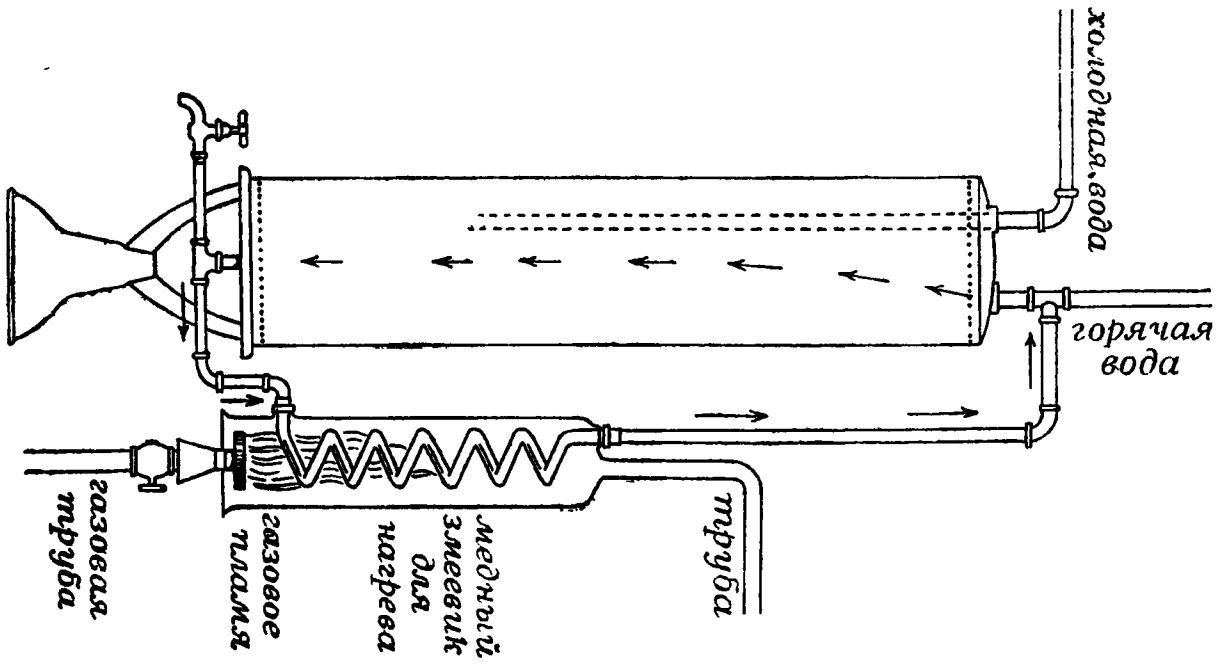


Рис. 198. Змеевик газового отопления.

трубе A в радиатор R и опять возвращается на дно печи через трубы B и D. Циркуляция происходит благодаря тому, что столб воды в A горячее, а потому менее плотный, чем вода в трубе B.

Эту систему отопления легко превратить в систему парового отопления: достаточно только убрать испаритель и частично наполнить котел водой (см. стр. 184).

На паровых радиаторах имеются воздушные клапаны (рис. 200), позволяющие воздуху из радиатора выходить навстречу входящему потоку пара. Воздух выходит через небольшое отверстие B, и если вода проникла через клапан, то она вся выходит в радиатор по трубе T. Когда горячий пар придает клапану вид, показанный на рис. 200, в закрытой капсуле C (показанной частично в разрезе)

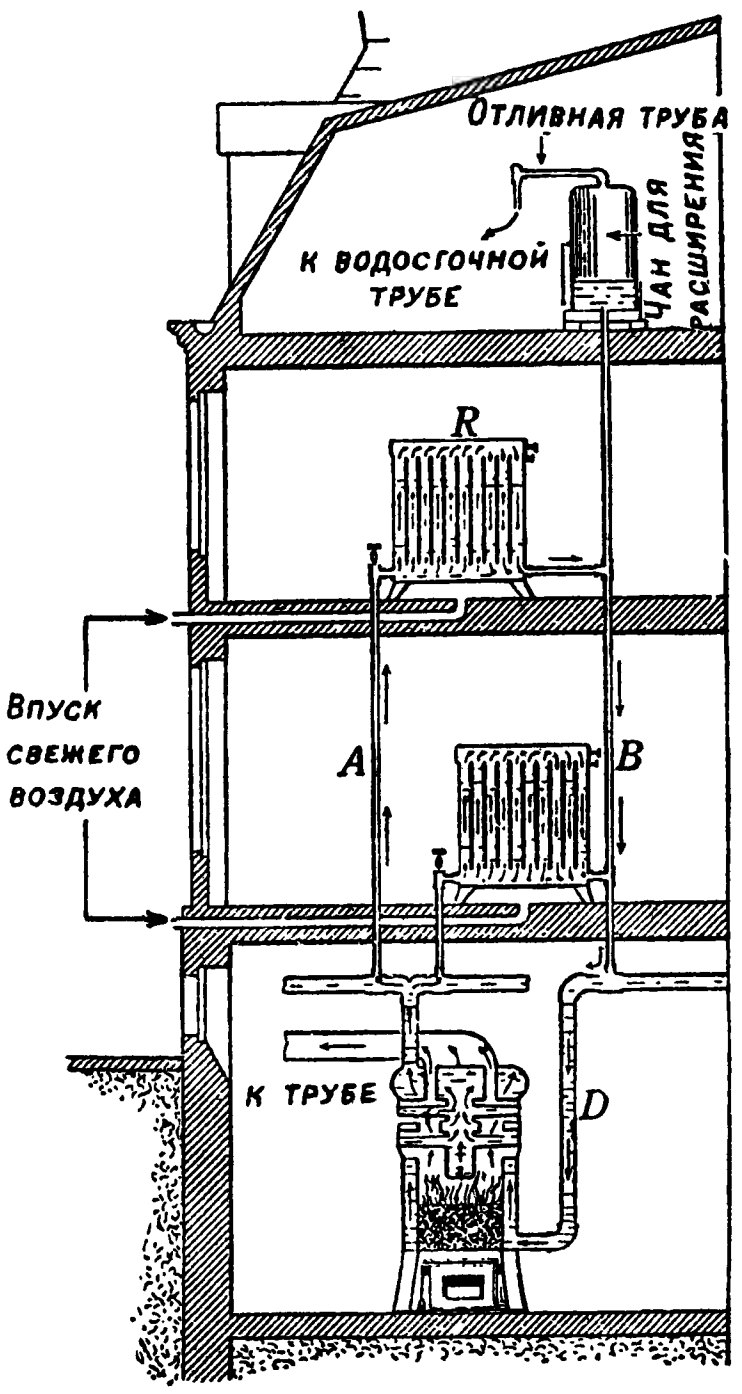


Рис. 199. Водяное отопление.

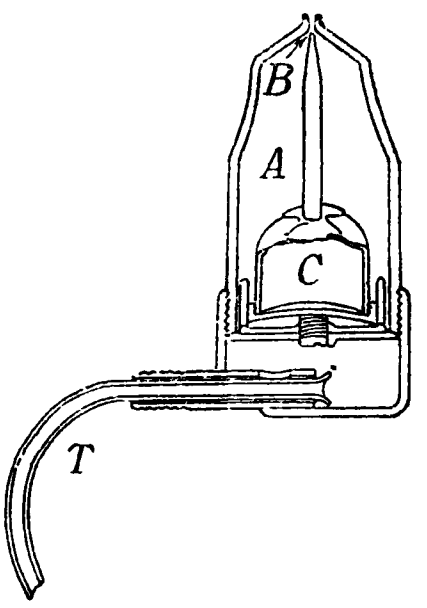


Рис. 200. Воздушный клапан радиатора.

начинает испаряться летучая жидкость (хлористый эфир); при этом вогнутое дно вдавливается вниз, так что капсула и игла A поднимаются и закрывают отверстие B.

Резюме. **Конвекция—это распространение тепловой энергии посредством подъема нагретых слоев жидкости и опускания холодных, более плотных слоев**

Излучение — это происходящее со скоростью света распространение энергии, которая при поглощении материей проявляется в виде тепловой энергии.

Тепловые лучи очень мало нагревают полированную серебряную поверхность, так как они почти все отражаются от нее.

Вентиляция, воздушное и водяное отопление являются применением конвекции.

В паровом отоплении каждый конденсировавшийся в радиаторах грамм пара выделяет 539 калорий.

Вопросы и задачи.

1. Каким образом вашей руке передается теплота от радиатора, когда вы до него дотрагиваетесь? Когда вы подносите к нему руку сбоку (не дотрагиваясь), когда вы держите руку несколько выше радиатора?
2. Объясните устройство термоса.
3. Почему в системе водяного отопления труба, по которой вода возвращается, всегда соединена с дном кипятильника, а выводная труба — с его верхней частью?
4. Когда мы хотим разжечь огонь в кухонной плите, то, если труба в это время холодная, — плита «дымит».
Объясните это.
5. Объясните происхождение бризов, дующих в прибрежных областях в летние дни.
6. Почему полая стена, заполненная опилками, является лучшим непроводником теплоты, чем эта же стена, заполненная одним только воздухом?
7. Который из трех способов распространения теплоты играет главную роль при отоплении комнаты камином?
8. В течение 1 часа в радиаторе сконденсировалось 4 *кг* пара при 100°С. Получившаяся при этом вода вышла из радиатора при температуре 92°С. Сколько калорий в секунду уходило за это время на отопление комнаты?

ГЛАВА XII.

МАГНЕТИЗМ.

ОБЩИЕ СВОЙСТВА МАГНИТОВ.

264. Магниты. Уже много веков тому назад было известно, что некоторые образцы руды, называемой магнетитом ($F_3\ O_4$), обладают способностью притягивать мелкие кусочки железа и стали. По всей вероятности, название свое эта руда получила от названия древнего города Магнезии (в Малой Азии). Куски этой руды, способные притягивать кусочки железа и стали, называются естественными м а г н и т а м и.

С древних времен известна также и возможность приготовлять искусственные магниты: для этого достаточно провести естественным магнитом по куску стали. Но только в XII веке было обнаружено, что свободно п о д в е ш е н н ы й м а г н и т в с е г д а р а с п о л а г а е т с я в н а п р а в л е н и и с с е в е р а н а ю г.

С этих пор и естественные и искусственные магниты стали употребляться для определения направления. Первое упоминание об употреблении компаса в Европе относится к 1190 году. Думают, что компас был завезен в Европу из Китая (относительно жирокомпаса см. стр. 193).

В настоящее время магниты изготовляют, или проводя в одном направлении магнитом по стальному стержню, или пропуская через такой стержень электрический ток (об этом подробнее будет сказано

ниже). На рис. 201 изображен прямолинейный магнит, а на рис. 202 — подковообразный магнит Эта последняя форма магнита — наиболее часто встречающаяся — лучше всего притягивает.

Рис. 201.

Положим магнит на кучу железных опилок. Мы увидим, что опилки целыми пучками облепят концы магнита, а в середине магнита их почти совсем не будет (рис. 203). Создается такое впечатление, что притяжение магнита сосредоточено в двух точках, около его концов. Эти точки называются полюсами магнита. Конец свободно подвешенного магнита, указывающий на север, называется северным полюсом N (Nord — значит север), другой конец называется южным полюсом S (Sud — юг). Направление магнитной стрелки компаса называется магнитным меридианом.

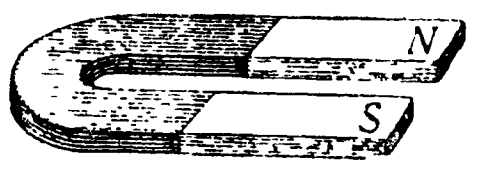


Рис. 202. Подковообразный магнит.

265. Законы магнитного притяжения и отталкивания. В опыте с железными опилками не было заметно никакого особого различия между действием обоих полюсов. Однако такое различие существует. Это можно доказать, имея 2 магнита, из которых один свободно подвешен (рис. 204). Если сблизить 2 северных (N) полюса, они отталкиваются. Точно также отталкиваются и два южных (S) полюса. Но северный полюс одного магнита притягивается южным полюсом другого. Эти наблюдения можно высказать в общей форме так: одноименные магнитные полюса отталкиваются, а разноименные — притягиваются. Сила, с которой любые два полюса действуют друг на друга в воздухе, равна произведению силы их полюсов, деленному на квадрат расстояния между ними. Говорят, что сила полюса равна единице, если этот полюс, будучи на расстоянии 1 *см* от равного и подобного ему полюса, отталкивается в воздухе с силой в 1 дину.

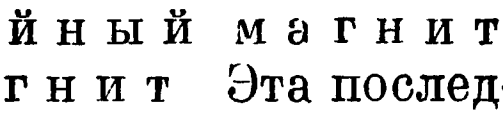


Рис. 203. Железные опилки, приставшие к прямолинейному магниту.

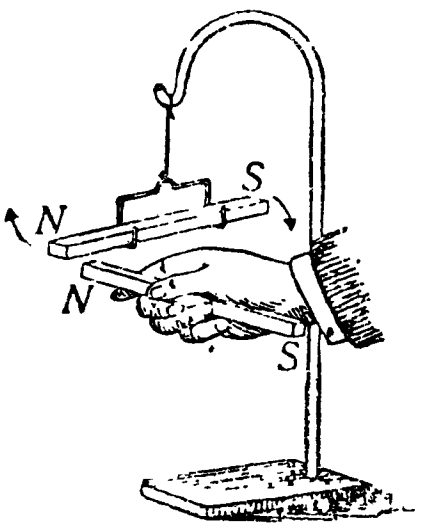


Рис. 204. Магнитные притяжение и отталкивание.

266. Магнитные тела. Заметными магнитными свойствами обладают только железо и сталь. Никкель и кобальт тоже притягиваются сильными магнитами. Висмут, сурьма и целый ряд других веществ не только не притягиваются, а даже отталкиваются от магнита, но, правда, очень слабо. Недавно было установлено, что из некоторых не магнитных веществ можно изготовлять сильно магнитные сплавы. Так, напр., сплав 65% меди, 27% марганца и 8% алюминия сильно магнитен. Этот сплав называется сплавом Гейслера. Однако для практических целей можно считать железо и сталь единственными магнитными материалами.

267. Магнитная индукция (влияние). Подвесим на одном конце

прямолинейного магнита маленький немагнитный гвоздик. Оказывается, на этом гвозде можно подвесить второй гвоздь, на втором — третий, и т. д. И каждый гвоздик сам, как магнит, притягивает следующий гвоздик (см. рис. 205). Если же осторожно отделить магнит от первого гвоздя, — все гвозди сейчас же распадутся. Это показывает, что гвозди были сильными магнитами, только — пока они соприкасались с магнитом. Всякий кусок мягкого железа можно сделать временным магнитом, приведя его в соприкосновение с постоянным магнитом. Более того. Не нужно даже и настоящего соприкосновения. Стоит просто поднести кусок железа достаточно близко к постоянному магниту. — и кусок этот сам становится магнитом. Это можно доказать следующим образом. Опустим один конец гвоздя, находящегося вблизи одного из полюсов магнита, в кучку железных опилок, как показано на рис. 206. Опилки пристанут к кончику гвоздя. Можно даже поместить между N и S пластинку из стекла, меди или любого другого материала, кроме железа, — и количество опилок, приставших к S[1], не изменится. Отсюда ясно, что немагнитные вещества прозрачны для магнитных сил. Стоит только отодвинуть постоянный магнит, большая часть опилок упадет. Магнетизм, вызванный одним только близким присутствием постоянного магнита, называется индуцированным магнетизмом.

Рис. 205. Магнетизм, передающийся через соприкосновение.

Исследуя индуцированный магнетизм гвоздя (см. рис. 206) с помощью магнитной стрелки, мы увидим, что удаленный от магнита полюс индуцированного магнетизма — одноименный с индуцирующим полюсом, а ближайший полюс — разноименен с ним. Это общий закон магнитной индукции.

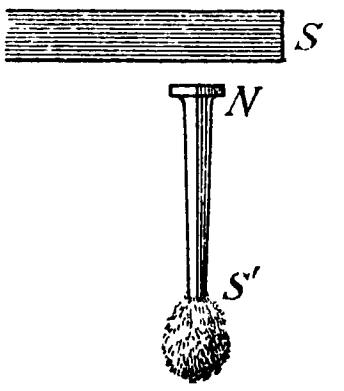


Рис. 206. Магнетизм, передающийся без соприкосновения.

Теперь понятно, почему магнит притягивает ненамагниченный кусок железа. Сперва магнит этот кусок железа намагничивает через индукцию, причем ближайший к магниту полюс делается разноименным с индуцирующим полюсом, а удаленный полюс — одноименным с ним. Таким образом, два разноименные полюса оказываются ближе друг к другу, чем одноименные полюса. Поэтому притяжение превосходит отталкивание и толкает железо к магниту.

Магнитной индукцией объясняется также образование куч железных опилок на полюсах прямолинейного магнита (см. рис. 203). Дело в том, что каждый маленький кусочек железа становится временным магнитом, повернутым к индуцирующему полюсу другого названия. То, что опилки как бы стоят дыбом, обусловлено отталкиванием одноименных полюсов опилок друг от друга.

268. Ретентивность и магнитная проницаемость. Кусок мягкого железа очень легко превращается в сильный временный магнит,

Но при удалении от магнита он теряет, практически, весь свой магнетизм.

Иначе ведет себя сталь. Кусок стали не намагничивается так сильно, как мягкое железо, но зато при удалении от постоянного магнита он в гораздо большей степени удерживает свои магнитные свойства.

Эта способность сопротивляться как намагничиванию, так и размагничиванию, называется ретентивностью. Ретентивность стали гораздо больше, чем у наклепанного железа; и чем тверже сталь, тем больше ее ретентивность.

Про вещество, способное сильно намагничиваться под действием постоянного магнита, говорят, что оно обладает большой м а г н и т н о й п р о н и ц а е м о с т ь ю. При этом безразлично, велика ли ретентивность вещества, или нет. Так, напр., железо гораздо более проницаемо, чем никкель, но при слабых магнитных полях один недавно изготовленный сплав железа и никкеля, так называемый п е р м а л л о й, обладает в 30 раз более сильной проницаемостью, чем мягкое железо.

269. Магнитные линии сил. Если бы могли отделить друг от друга северный (N) и южный (S) полюсы маленького магнита и получили бы

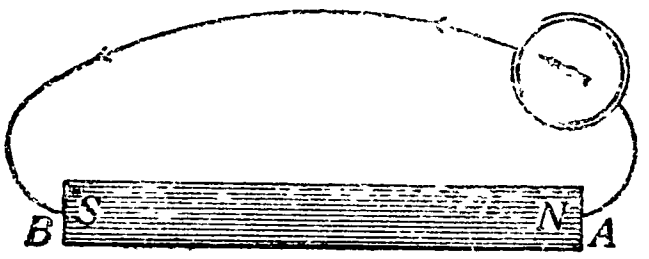


Рис. 207. Линии сил магнита AB.

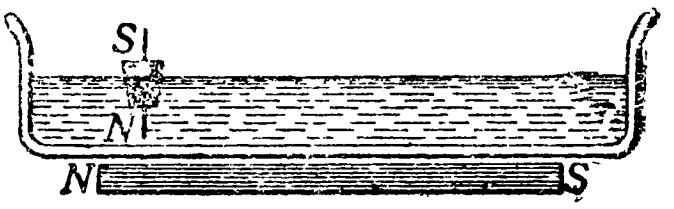


Рис. 208. Направление движения изолированного северного полюса вблизи магнита.

отдельно северный (N) полюс, можно было бы произвести с ним интересный опыт. Если бы мы поднесли наш северный полюс к северному полюсу прямолинейного магнита, наш полюс оттолкнулся бы и начал бы двигаться по некоторому криволинейному пути (как на рис. 207) к южному полюсу S. Путь этот был бы искривлен потому, что на наш полюс все время действовали бы две силы: отталкивающая от N и притягивающая — к S. Соотношение этих сил все время непрерывно менялось бы по мере изменения расстояния нашего полюса от полюсов магнита.

Проверить результат этого воображаемого опыта можно на настоящем опыте. Возьмем сильно намагниченную иголку, воткнем ее в пробку и погрузим эту пробку в плоский сосуд с водой так, чтобы она держалась на воде. Затем поместим непосредственно под дном сосуда или над сосудом прямолинейный или подковообразный магнит (см. рис. 208). Тогда пробка с иглой будет двигаться так же, как двигался бы свободный полюс; удаленный полюс иглы находится от магнита настолько дальше ближнего полюса, что его влиянием на движение иглы можно пренебречь. Мы увидим, что пробка, действительно, продвинется по криволинейному пути от N к S.

Всякий путь, по которому независимый северный (N) полюс продвинулся бы от N к S, называется л и н и е й с и л.

Найти направление линии сил в какой-нибудь точке вблизи магнита можно очень просто. Достаточно поместить в этой точке магнитную стрелку. Она сама собой примет направление, по которому двигались бы ее полюсы, если бы они были свободными. А это и есть линия сил, проходящая через данную точку (см. рис. 207,*C*).

270. Силовое поле. Пространство, окружающее магнит, в котором

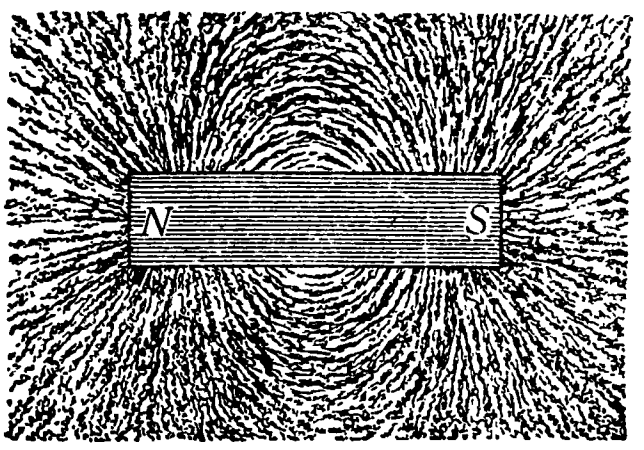


Рис. 209. Распределение железных опилок около прямолинейного магнита.

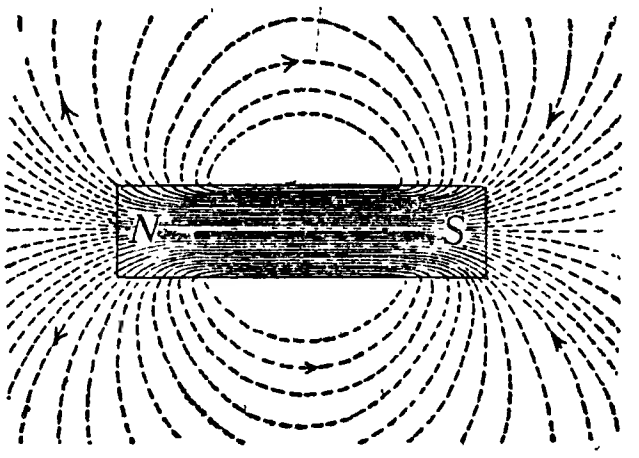


Рис. 210. Идеальный чертеж поля прямолинейного магнита.

могут быть обнаружены магнитные силовые линии, называется с и л о в ы м п о л е м.

Чтобы составить себе представление о том, как расположены силовые линии в магнитном поле любого магнита, сделаем такой опыт. Поместим непосредственно над магнитом кусок бумаги, на которой насыпаны железные опилки. Каждый кусочек железа становится временным магнитом через влияние и потому устанавливается, как магнитная стрелка, в направлении линии сил, проходящей через занимаемое им место. На рис. 209 показано, как располагаются опилки вокруг прямолинейного магнита. На рис. 210 дан соответствующий чертеж линий сил. Мы видим, что они выходят из северного по-

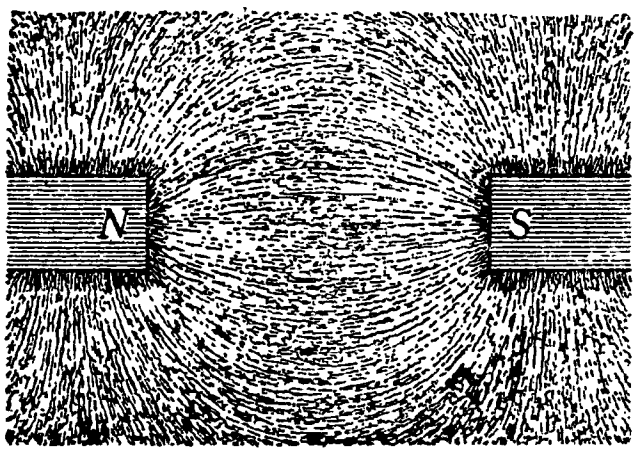


Рис. 211. Распределение железных опилок между неодинаковыми полюсами.

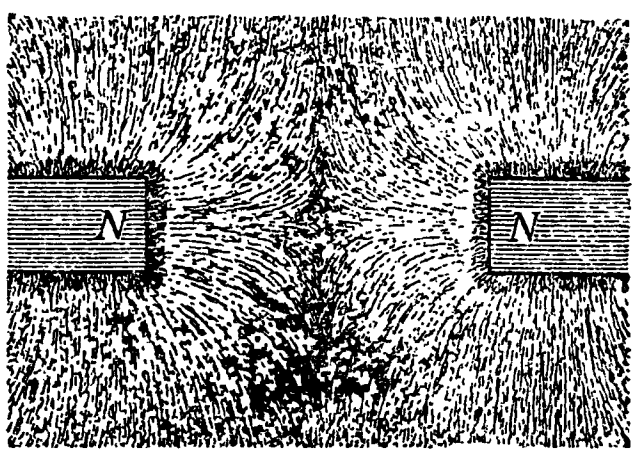


Рис. 212. Распределение железных опилок между одинаковыми полюсами.

люса (N) и по криволинейному пути приходят в южный полюс (S). Обычно представляют себе эти линии продолжающимися внутри магнита и возвращающимися через магнит в северный полюс, так что каждая линия получается замкнутой. Такое представление было впервые введено Фарадеем. Оно дало очень много для объяснения различных магнитных явлений и приведения их в систему. На

рис. 211 и 212 показано расположение железных опилок между разноименными (1) и одноименными (2) полюсами.

Единичное магнитное поле мы определяем как поле, в котором на единичный магнитный полюс действует сила в 1 дину. Обыкновенно такое поле графически изображают так: через каждый *кв. см* поверхности перпендикулярной к линиям сил (*ABCD* на рис. 213), проводят 1 линию. Если бы единичный северный полюс, находясь между N и S (рис. 213), испытывал силу в 1 000 дин, то сила поля была бы равна 1 000 единицам, и поле изображалось бы с помощью 1 000 линий на каждый *кв. см*.

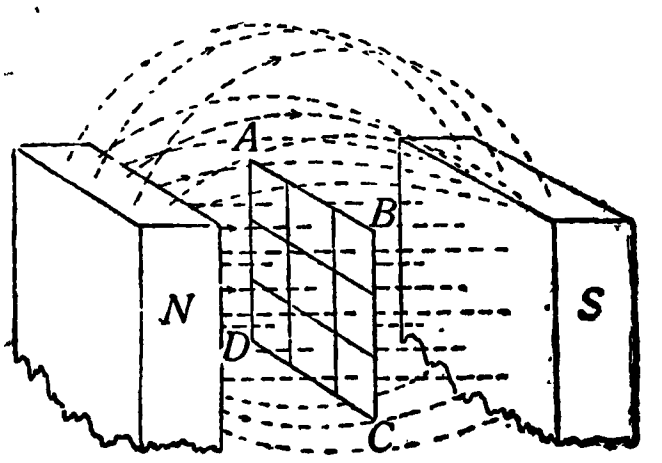


Рис. 213. Сила магнитного поля изображается числом линий сил, приходящихся на 1 *кв. см*.

271. Природа магнетизма. Если несколько раз провести магнитом по маленькой пробирке, наполненной железными опилками, пробирка сама превратится в магнит. Но она сразу размагнитится, если встряхнуть опилки. Намагниченная вязальная спица при нагревании докрасна полностью теряет свои магнитные свойства. Точно также, если бить по такой спице молотком, скручивать ее или заставить сильно колебаться, сила ее полюсов значительно уменьшится; сила в этом случае измеряется способностью притягивать опилки и гвоздики. Все это заставляет думать, что магнетизм как-то связан с расположением атомов, молекул или мелких молекулярных аггреггатов. Ведь как раз причины, вызывающие сильные движения частичек в магните, ослабляют его магнитные свойства. Далее. Если сломать намагниченную иголку, то каждая часть ее сделается полным магнитом. Т. е., в месте разлома появятся 2 новых полюса: на части, содержащей первоначальный северный полюс (N), появится южный (S), а на другой части — северный полюс (N). Такое деление можно производить безграничное количество раз, — результаты будут все время одинаковые (см. рис. 214). Это доказывает, что какие-то мельчайшие частички прямолинейного магнита сами, быть может, являются маленькими магнитами, расположенными в ряды, так что соприкасаются их разноименные полюса.

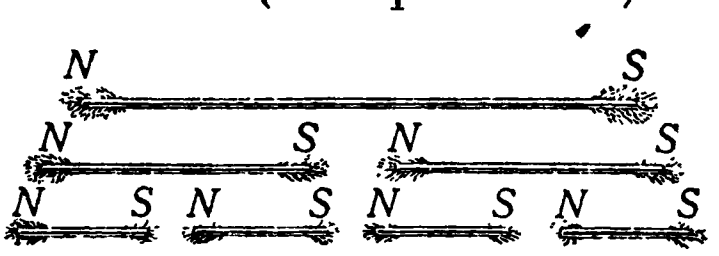


Рис. 214. Дробление магнита.

Если сильно ударять по куску ненамагниченной стали, лежащему между полюсами магнита, или если нагреть этот кусок стали докрасна и дать ему остынуть между полюсами магнита, — он намагнитится. Отсюда ясно, что какие-то очень мелкие частички внутри стали являются магнитами, даже когда весь кусок стали в целом — не магнит. Повидимому, намагничивание состоит в расположении этих мелких магнитов в ряды друг возле друга. Вспомним, что намагничивание пробирки с железными опилками, о котором было сказано выше, тоже было связано с особым расположением опилок.

272. Теория магнетизма. Итак, очень возможно, что в ненамаг-

ниченном железном или стальном стержне какие-то мелкие частички являются маленькими магнитами и расположены внутри стержня или как попало, или маленькими замкнутыми группами, или цепочками, как на рис. 215. Таким образом, противоположные полюса нейтрализуют друг друга, и весь стержень в целом не является магнитом. Но при приближении этого стержня к магниту внешняя магнитная сила заставляет все эти магнитики повернуться и расположиться так, как на рис. 216. Тут уже противоположные полюса нейтрализуют друг друга полностью только в середине стержня. Согласно такому представлению, нагревание и сотрясение потому ослабляют магнит, что при этом нарушается правильное расположение частичек в ряды. И наоборот: когда стержень находится между полюсами магнита, сотрясение и нагревание облегчают намагничивание, так как они помогают магнитным силам разрушить замкнутые группы и цепи отдельных мелких магнитиков и расположить их в ряды. Проницаемость мягкого железа больше проницаемости твердой стали, потому что гораздо легче заставить его частички повернуться и выстроиться в ряды. Сталь обладает гораздо большей ретентивностью чем мягкое железо, так как гораздо труднее нарушить расположение ее частичек в ряды.

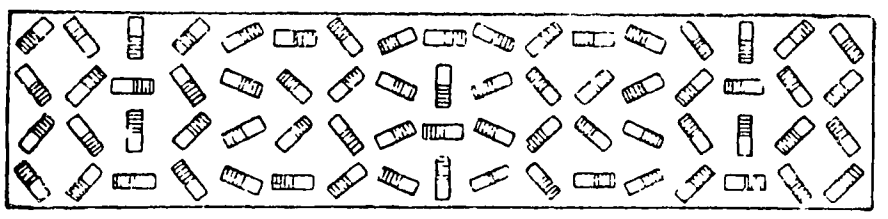


Рис. 215. Распределение частичек в ненамагниченном железном стержне.

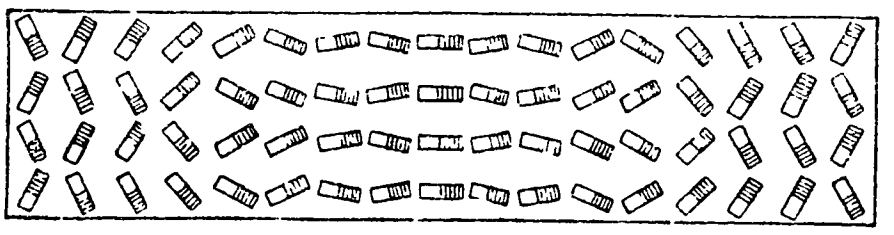


Рис. 216. Распределение частичек в намагниченном железном стержне.

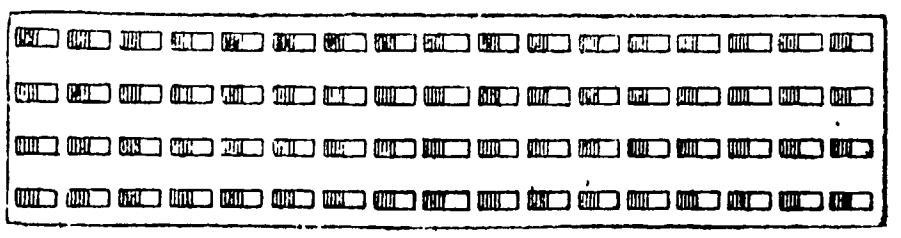
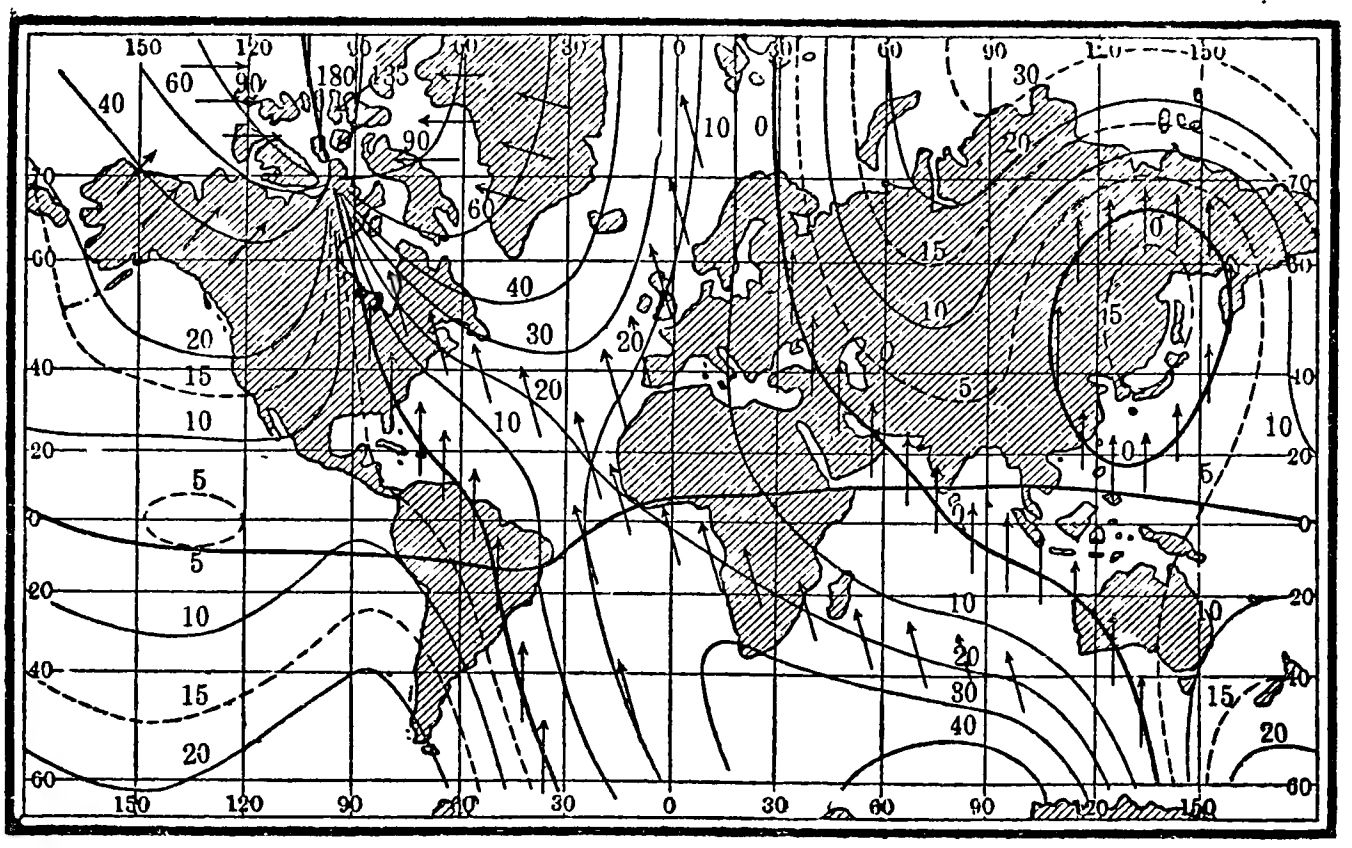


Рис. 217. Распределение частичек в насыщенном магните.

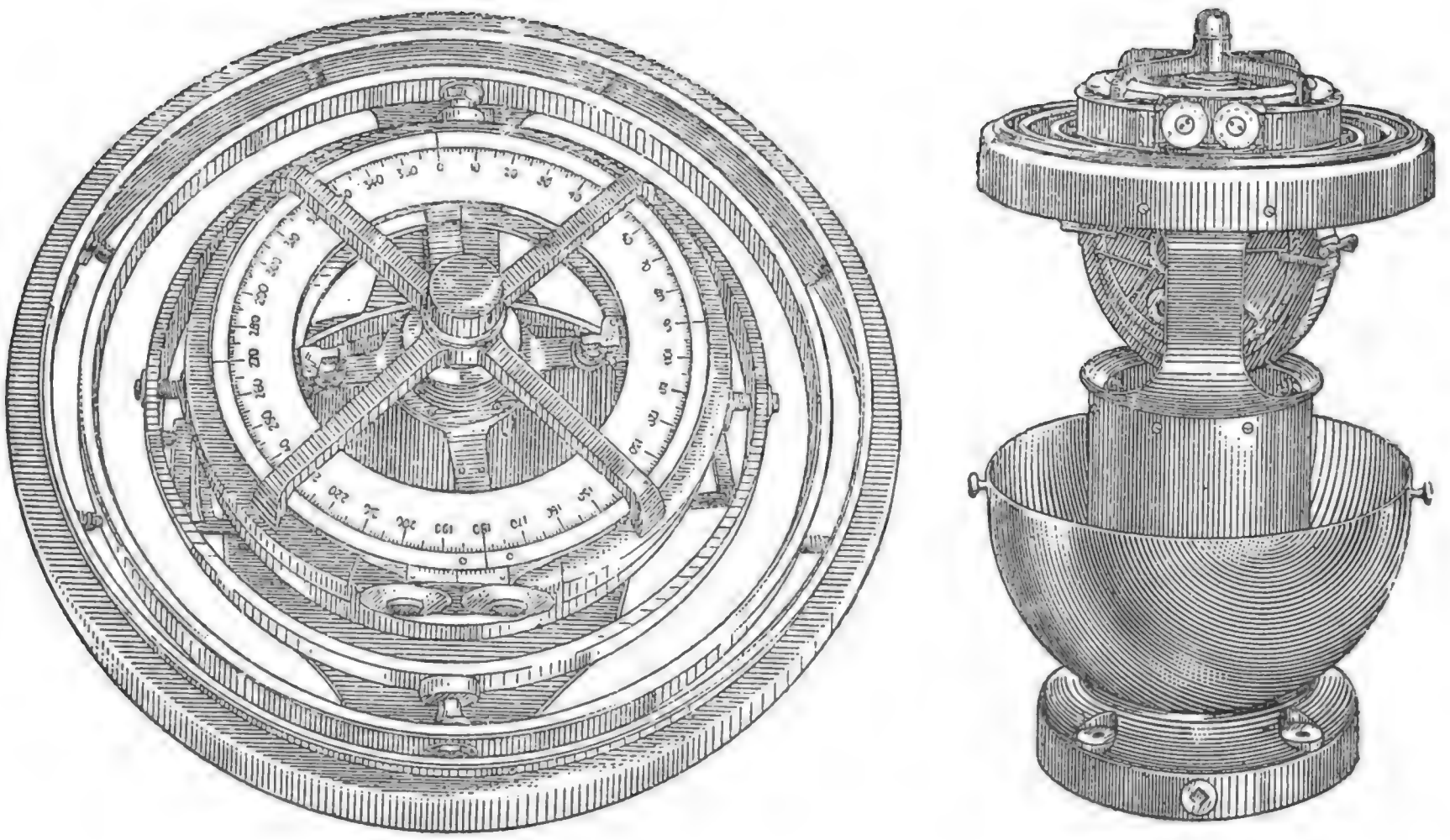
273. Насыщение. Очень ясное подтверждение правильности только что изложенного взгляда дает следующий факт: кусок железа или стали может быть намагничен только до некоторого предела, независимо от намагничивающей силы. По всей вероятности, предел этот наступает тогда, когда оси всех элементарных магнитиков делаются параллельными, как на рис. 217. Такой магнит называется н а с ы щ е н н ы м, так как сильнее его уж нельзя намагнитить.

ЗЕМНОЙ МАГНЕТИЗМ.

274. Магнетизм земли. Мы уже видели, что магнитная стрелка указывает на север и на юг, — по крайней мере, приблизительно. Это значит, что сама земля является громадным магнитом. Южный полюс этого земного магнита расположен вблизи географического северного полюса, а северный полюс — вблизи географического



МАГНИТНЫЙ ЭКВАТОР ЗЕМЛИ И ИЗОГОНЫ.
Стрелки указывают направление стрелки компаса.



ЖИРОКОМПАС.

Хотя только Гильберт (XVI в.) первый правильно объяснил действие морского компаса, но изобрели его китайцы, а в Европе он появился в 1200 г. До недавнего времени он был единственной опорой моряков. Но теперь у него есть помощник,— жирокомпас, ныне широко употребляемый на военных судах, и исключительно — на подводных лодках, железная оболочка которых делает в них употребление компаса невозможным. Жирокомпас состоит из тяжелого колеса, делающего вокруг горизонтальной оси 8600 оборотов в минуту с помощью индукционного мотора. Благодаря его инерции, колесо это стремится сохранить плоскость вращения. Однако, вращение Земли стремится вывести его из этой плоскости, если только ось вращения жирокомпаса и Земли не лежат уже в одной плоскости. Таким образом, возникает пара сил, приводящая ось жирокомпаса в совпадение с плоскостью земной оси.

южного полюса. Это ясно: магнитный полюс Земли, расположенный вблизи географического северного полюса, очевидно, должен быть разноименным с повертывающимся к нему полюсом подвешенного магнита. На север всегда указывает именно тот полюс подвешенного магнита, который мы условились называть северным (N). Магнитный полюс Земли, находящийся вблизи географического северного полюса, был открыт в 1831 г. Джемсом Россом из Боотии (Канада) на 70°30′ северной широты, 95° западной долготы. В 1905 г. капитан Амундсен (в 1912 г. открывший географический южный полюс и в 1926 г. перелетевший через географический северный полюс) снова определил положение южного магнитного полюса Земли и нашел, что он расположен немного западнее. Его приблизительное местоположение — 70°5′ сев. широты и 96°46′ западной долготы. Очень вероятно, что его положение медленно меняется.

275. Склонение. Как только люди начали пользоваться компасом, они увидели, что стрелка его указывает на север не совсем точно. Во время своего путешествия в Америку Колумб, к большому ужасу своих матросов, обнаружил, что направление стрелки компаса меняется при передвижении по земной поверхности. Главная причина такого изменения в том, что магнитные полюсы Земли не совпадают с ее географическими полюсами. Но, кроме того, имеются и другие причины. Например, присутствие крупных залежей железной руды. Такие залежи вызывают местное изменение направления магнитной стрелки.

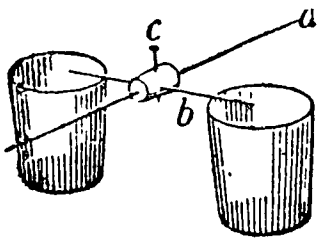


Рис. 218. Иллюстрация склонения.

Отклонение направления магнитной стрелки в каком-нибудь месте на Земле от направления на северный полюс называется склонением этого места. На карте на стр. 193 каждая линия проведена так, что во всех точках, через которые она проходит, склонение одно и то же. Линии, соединяющие точки земной поверхности с одинаковым склонением, называются изогональными линиями (изогонами). На карте сплошные линии проходят через все точки, магнитная стрелка указывает совершенно точно на север, т. е. линии эти соединяют места, где склонение равно нулю. Линия нулевого склонения называется агональною линией (агоной).

276. Стрелка наклонения. Воткнем в пробку две ненамагниченных вязальных спицы *a* и *b* (рис. 218), как показано на рисунке. Затем укрепим булавку *c* так, чтобы вся система находилась в безразличном равновесии около оси *b*, и чтобы *a* в это время указывало с востока на запад. Затем осторожно намагнитим *a*. Для этого проведем от середины *a* к одному концу — северным полюсом сильного магнита, а от середины к другому концу *a* — южным полюсом этого же магнита. Если потом позволить спице свободно качаться в вертикальной плоскости, проходящей через северный и южный полюсы, она наклонится и будет составлять с горизонтом угол в 60° — 70°, причем северный полюс будет ниже. Этот опыт показывает, что на данной широте магнитные линии Земли составляют большой угол с горизонтом. Этот угол между поверхностью Земли и направлением магнитных линий называется наклонением стрелки. В Вашингтоне оно

равно 71°5′, а в Чикаго — 72°50′. На магнитном полюсе оно, конечно, равно 90°, а на так называемом магнитном экваторе, представляющем собою неправильную кривую линию и расположенном вблизи географического экватора, наклонение равно 0° (см. карту на стр. 193). Линии, соединяющие точки земной поверхности с одинаковым наклонением, называются изоклинами. Стрелка наклонения показана на рис. 219.

277. Индуктирующее действие Земли. Земля действует как большой магнит. Это очень ярко иллюстрируется следующим образом.

Если держать стальной стержень параллельно магнитным линиям Земли (так, чтобы направление его совпало с направлением стрелки наклонения), то несколькими сильными ударами молотка можно превратить стержень в магнит. Верхний конец станет южным полюсом, а нижний — северным. Если изменить направление стержня на прямо-противоположное и опять ударять его молотком, полюсы его переменятся местами. Если держать его в направлении с востока на запад и ударять, стержень размагнитится, и теперь уж оба его конца будут притягиваться обоими полюсами магнитной стрелки.

Стержень из мягкого железа, пожалуй, скорее подойдет для этого опыта, чем стальной стержень, в виду меньшей ретентивности мягкого железа.

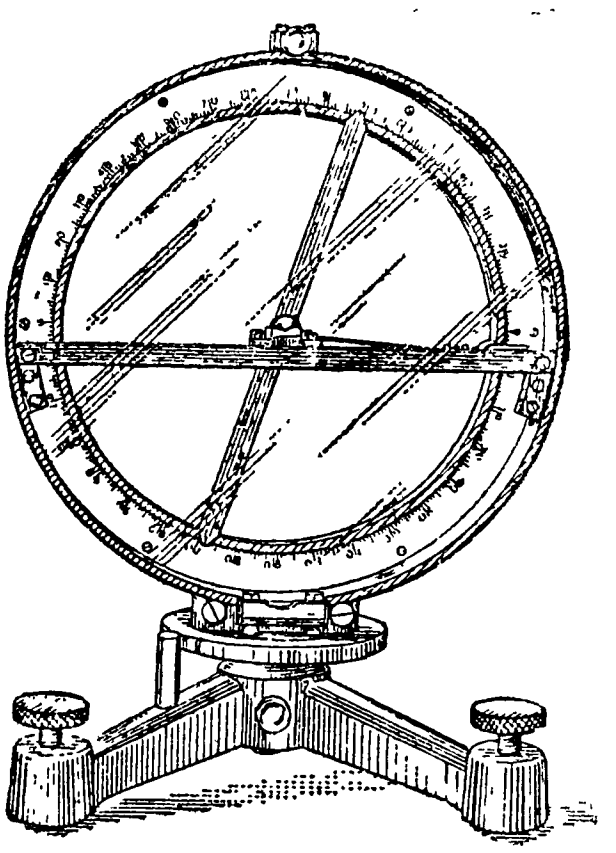


Рис. 219. Стрелка.

Резюме. **Одноименные полюсы отталкиваются; разноименные полюсы притягиваются.**

Единичным полюсом называется полюс, отталкивающий равный и однородный с ним полюс, находящийся на расстоянии 1 *см*, с силой в 1 дину.

Магнитной линией сил называется путь, по которому стремится двигаться свободный северный полюс.

Магнитным полем единичной силы называется поле, в котором на единичный полюс действует сила в 1 дину.

Склонением данного места называется число градусов, на которое направление магнитной стрелки в этом месте отличается от действительного направления на север.

Наклонением данного места называется угол между горизонтальной плоскостью и направлением стрелки наклонения.

Магнитный экватор — это неправильная линия, соединяющая те точки Земли, в которых наклонение равно нулю.

Вопросы и задачи.

1. Придумайте опыт, который показал бы, что кусок железа так же притягивает магнит, как магнит притягивает железо.
2. С помощью магнита можно легко узнать, намагничена ли иголка. Если иголка отталкнется от магнита, значит, она намагничена. Почему?
3. Даны 2 прямолинейных магнита, на которых не проставлены названия полюсов. Как бы вы определили, который из их полюсов поворачивается к северу? Как бы вы определили, который из них сильнее намагничен?
4. Сделайте чертеж, указывающий общий вид линии сил между разноименными полюсами 1) двух прямолинейных магнитов. 2) двух одноименных магнитов.
5. Положим, что мы превратили во временный магнит стержень из мяг-

кого железа, поднеся его близко к северному полюсу прямолинейного магнита. Какой полюс будет на конце стержня, ближайшем к магниту? Северный или южный?

Объясните подробно.

6. Объясните с помощью намагничивания через влияние, как происходит притяжение куска мягкого железа магнитом.

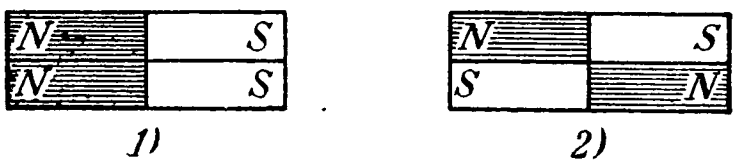


Рис. 220.

7. Два прямолинейных магнита одинаковой силы соединены как на рис. 220 (1), а затем как на рис. 220 (2). Нарисуйте, как вы себе представляете их линии сил в обоих случаях. Проверьте ваше представление с помощью железных опилок и куска картона, а также поднимая магнитами ряд мелких гвоздиков.

8. Исследуйте карту на стр. 193 и определите, в каких местах стрелка компаса указывает на север, юг, восток, запад.

9. Исследуйте карту на стр. 193 и найдите линию нулевого наклонения — магнитный экватор. Совпадет ли он где-нибудь с географическим экватором? Если да, то где?

ГЛАВА XIII.

ЭЛЕКТРОСТАТИКА.

ОСНОВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ.

278. Электризация трением. Если палочку из каучука или сургуча потереть о фланель или о кошачий мех, а потом поднести ее к сухим шарикам из бузинной сердцевины, кусочкам бумаги или к каким-нибудь другим мелким телам, мы увидим, что тела эти подскочат к нашей палочке. Такое же притяжение мы часто наблюдаем, причесываясь зимой каучуковой гребенкой — она притягивает наши волосы, и они становятся дыбом. Такого рода явления были известны уже в 600 году до нашей эры. Греческий философ Ф а л е с писал тогда о свойстве янтаря, потертого о шерсть, притягивать к себе нити и другие легкие предметы. Но только в 1600 году нашей эры придворный врач королевы Елизаветы Вильям Д ж и л ь б е р т открыл, что такой же эффект получается при трении друг о друга не только янтаря и шелка, но и целого ряда других веществ. Так, напр., можно брать стекло и шелк, сургуч и фланель, каучук и кошачий мех и т. п.

Джильберта часто называют отцом современной науки об электричестве и магнетизме. Джильберт назвал причину явлений, возникающих при трении всех этих веществ, э л е к т р и ч е с т в о м, — от греческого слова э л е к т р о н, обозначающего «янтарь».

П р о т е л о, п о л у ч и в ш е е с п о с о б н о с т ь п р и т я г и в а т ь л е г к и е т е л а, г о в о р я т, ч т о о н о н а э л е к т р и з о в а н о и л и ч т о е м у с о о б щ е н э л е к т р и ч е с к и й з а р я д. При этом ничего не говорится о самой природе электричества. Мы просто говорим, что тело заряжено электричеством, если оно получило способность действовать на легкие тела так же, как янтарь или сургуч после трения их о шелк или шерсть. Мы не можем с уверенностью сказать, какова истинная сущность элек-

тричества. Но зато мы хорошо знаем законы, управляющие электрическими явлениями. Об этих законах мы сейчас и будем говорить.

279. Положительное и отрицательное электричество. Дотронемся стеклянной палочкой, предварительно наэлектризованной трением о шелк, до бузинного шарика, подвешенного на шелковой нити, как изображено на рис. 221. Благодаря этому изменится состояние шарика, и он сильно оттолкнется от палочки. Затем поднесем к заряженному шарику другую палочку, — из сургуча или эбонита, предварительно натертую кошачьим мехом или фланелью. Мы увидим, что шарик не только не оттолкнется от этой новой палочки, а наоборот — сильно притянется к ней. И обратно: если прикоснуться к бузинному шарику сургучом, шарик оттолкнется от сургуча, но этот же шарик сильно притянется стеклянной палочкой. Далее. Два бузинных шарика, оба прикоснувшиеся к стеклянной палочке, отталкивают друг друга; но если один шарик прикоснулся к стеклянной палочке, а другой к сургучу, они друг друга притягивают.

Отсюда ясно, что электризация стекла при трении о шелк и электризация сургуча при трении о фланель противоположны друг другу в том смысле, что наэлектризованное тело, притягиваемое стеклом, отталкивается от сургуча.

Поэтому говорят, что есть два рода электричества. Веньямин Франклин ввел для них названия положительное и отрицательное электричества, или + и — электричества.

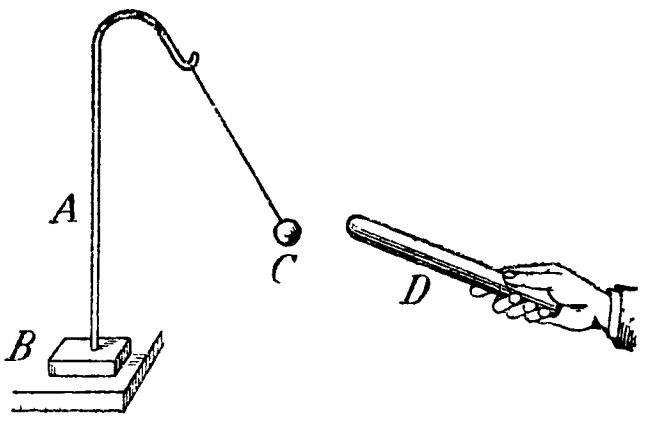


Рис. 221. Электроскоп с бузиновыми шариками.

Положительно наэлектризованными мы называем тела, которые действуют на другие наэлектризованные тела, как стеклянная палочка после трения ее о шелк. Отрицательно наэлектризованными мы называем тела, действующие как кусок сургуча, потертый о фланель. Пользуясь этими определениями, можно, на основании только-что приведенных фактов, высказать следующий общий закон: одноименные электрические заряды отталкиваются, разноименные — притягиваются друг другом. Электрические силы притяжения и отталкивания так же, как магнитные силы и сила тяжести, обратно-пропорциональны квадрату расстояния между телами.

280. Измерение количеств электричества. Определение и измерение так называемых количеств электричества основано на явлениях электрического притяжения и отталкивания. Так, напр., говорят, что небольшой заряженный шарик содержит 1 единицу электричества, если он отталкивает равный ему шарик, с одинаковым зарядом и расположенный на расстоянии 1 *см*, с силой в 1 дину.

Таким образом, число единиц электричества в заряженном теле измеряется силой, с которой это тело действует на единицу электричества, находящуюся от него на заданном расстоянии. Напр., заряд, отталкивающий единичный заряд, находящийся на расстоянии 10 *см*, с силой в 1 дину, содержит 100 единиц электричества, — так как этот заряд отталкивал бы единичный заряд, находящийся на расстоянии 1 *см*, с силой в 100 дин (см. § 279).

281. Проводники и непроводники. Соединим проволокой металлический шар *B* с электроскопом *E* (рис. 222). Электроскоп состоит из пары золотых

листочков *a* и *b*, укрепленных на изолированном металлическом стержне *r* и защищенных от потоков воздуха камерой *v*. Наэлектризуем теперь эбонитовую палочку и проведем ею по шару *B*. Золотые листочки сейчас же разойдутся. Это значит, что часть электрического заряда, сообщенного *B*, перешла по проволоке к золотым листочкам, которые и оттолкнулись друг от друга, как всякие 2 тела. заряженные одним и тем же электричеством.

Повторим этот опыт, заменив проволоку, соединяющую *B* с *E*, шелковой нитью или длинной деревянной палочкой. Мы не увидим никакого расхождения листочков.

Если соединить *E* и *B* сырой шелковой нитью, листочки медленно разойдутся; это значит, что электрический заряд может переходить по сырой шелковой нити.

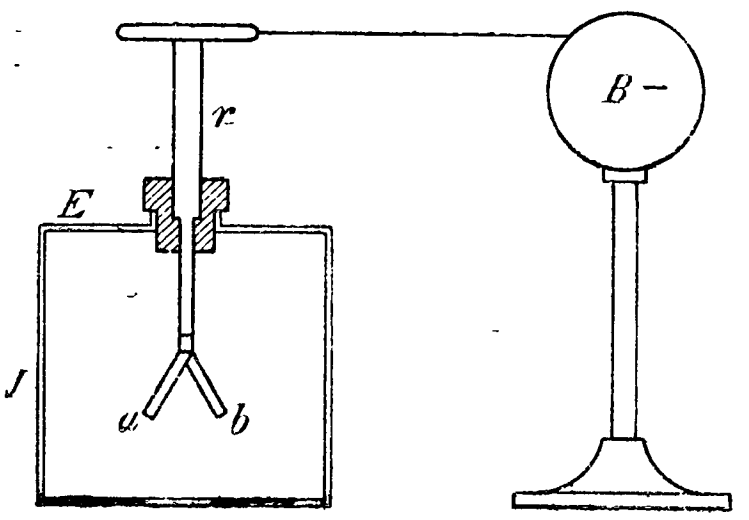


Рис. 222. Иллюстрация проводимости.

Эти опыты показывают, что электрический заряд совершенно свободно переходит из одной точки проволоки в другую, с трудом передвигается по сырой шелковой нити и совсем не в состоянии передвигаться по сухой шелковой нити и по дереву.

Поэтому принято все вещества делить на два класса: **проводники и непроводники** (или изоляторы), в зависимости от их способности переносить электрические заряды из одной точки в другую.

Так, напр., металлы и растворы солей и кислот в воде все являются проводниками электричества, а стекло, фарфор, каучук, слюда, шеллак, дерево, шелк, вазелин, скипидар, парафин и масла — все это изоляторы. Однако между проводниками и непроводниками нельзя прове ти резкой границы: все так называемые изоляторы все-таки немного проводят электричество, а так называемые проводники сильно отличаются друг от друга по своей способности проводить электрические заряды.

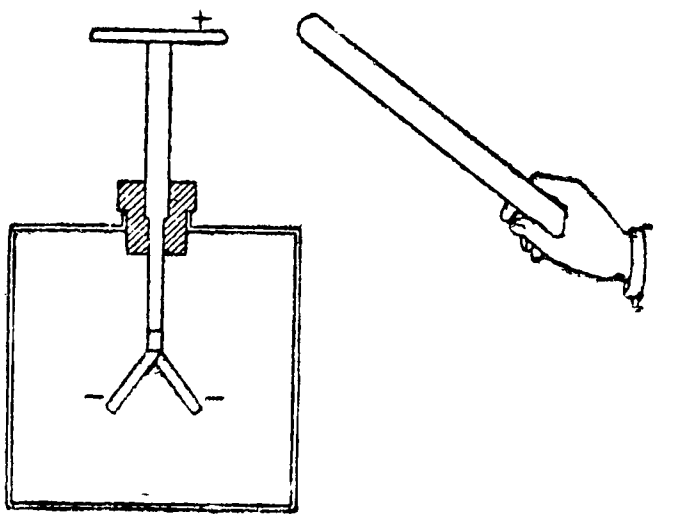


Рис. 223. Иллюстрация проводимости.

Явление проводимости ясно показывает различие между электричеством и магнетизмом. Магнитные полюсы существуют только в железе и стали. Электрический заряд можно сообщить любому телу, если только оно изолировано. Эти заряды распространяются по проводникам и могут быть путем соприкосновения переданы от одного тела другому, а магнитные полюсы не переходят с места на место, и магнитное состояние тел меняется только при соприкосновении их с магнитами.

282. Электростатическая индукция. Наэлектризуем эбонитовую палочку трением и медленно приблизим ее к шарику электроскопа с золотыми листочками (рис. 223). Листочки уже разойдутся, когда палочка будет еще на расстоянии 30 *см* от электроскопа.

Отсюда ясно, что для электризации проводника достаточно одного только **влияния** электрического заряда, находящегося побли-

вости от этого проводника. Это явление называется электростатической индукцией.

Стоит только удалить заряженную палочку от электроскопа, — как листочки его сразу сблизятся, или, как говорят, спадут. Это показывает, что такая электризация — только временная и существует только, пока заряженное тело находится поблизости.

283. Природа индуцированного электричества. Возьмем металлический шар A (рис. 224) и сильно наэлектризуем его трением о заряженную палочку. Затем поднесем его к изолированному металлическому телу B, на котором укреплены полоски бумаги или бузинные шарики a, b, c, как на рис. 224.

Расхождение a и c показывает, что, благодаря присутствию шара A, на концах тела B появились электрические заряды. Шарик b не отклонится. Это значит, что середина тела B — не заряжена. Далее. Палочка, наэлектризовавшая A, отталкивает шарик C и притягивает шарик A.

Отсюда мы заключаем, что в проводнике, находящемся вблизи заряженного тела, на одном конце — более далеком от заряженного тела — возникает электричество того же знака, что и на самом заряженном теле; а на другом конце проводника — ближайшем к заряженному телу — возникает противоположное электричество.

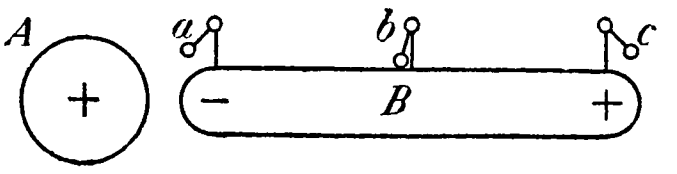
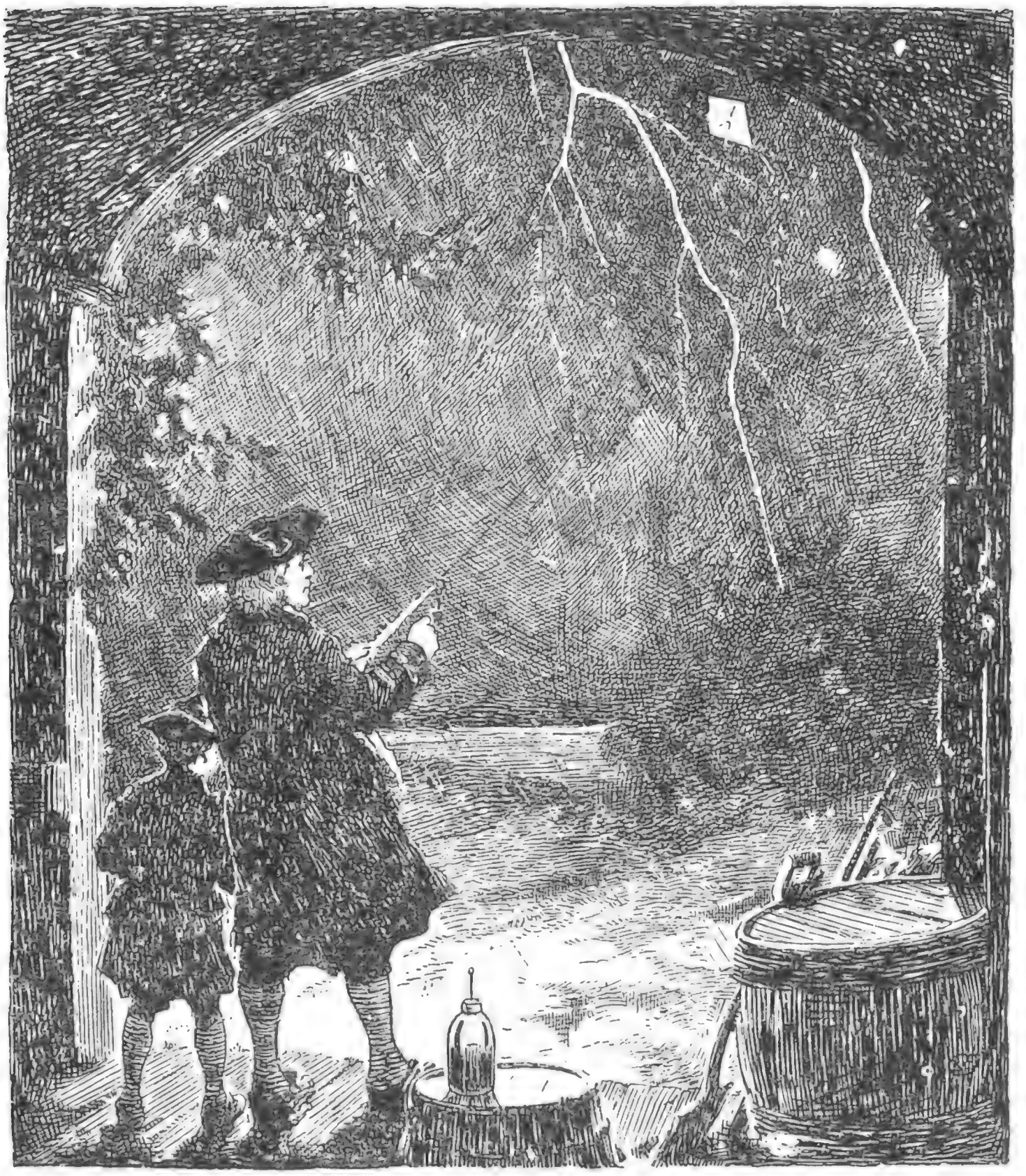


Рис. 224. Природа индуцированных зарядов.

284. Электронная теория. В настоящее время известно, что атомы всех веществ состоят из положительного и отрицательного электричества. Отрицательное электричество существует в виде мельчайших частичек, или электронов; масса такой частички равна $^1/_{1845}$ массы атома водорода. Эти электроны каким-то образом сгруппированы вокруг положительно заряженного ядра. Сумма отрицательных зарядов электронов равна положительному заряду ядра, так что в нормальном состоянии весь атом в целом — нейтрален, т. е. не заряжен. Но в проводниках электроны все время отрываются от одних атомов и входят в другие атомы, так что в каждый данный момент в каждом проводнике имеется некоторое количество свободных электронов и соответствующее количество атомов, потерявших электроны и заряженных поэтому положительно. Такой проводник в целом не заряжен ни положительным, ни отрицательным электричеством. Но стоит только приблизить к проводнику тело, заряженное хотя бы положительным электричеством (рис. 224), как свободные отрицательные электроны устремляются к концу проводника, ближайшему к заряженному телу, а положительно заряженные неподвижные атомы остаются позади. Если же поднести к проводнику отрицательно заряженное тело, то отрицательные электроны отталкиваются и уходят на удаленный конец проводника, а вблизи заряженного тела остаются неподвижные положительные атомы. Как только индуцирующий заряд удален, проводник опять становится нейтральным, так как отрицательные частицы, под влиянием притяжения положительных атомов, возвращаются в свое прежнее положение. Так мы

себе представляем в настоящее время механизм электризации через индукцию.

Заряд одного электрона называется эле-



ОПЫТ ФРАНКЛИНА СО ЗМЕЕМ.

В июне 1752 г. Франклин доказал идентичность электрической искры и молнии. Он сделал змей из шелкового платка. Нижний край веревки от змея и шелковый шнурок были привязаны к ключу. Чтобы заряд с ключа не уходил в землю через его тело, он держал в руках только изолирующий шелковый шнурок. Франклин стоял под крышей, чтобы шнурок был сухим, и, приближая сустав пальца к ключу, получал из него искры, как от его электрической машины. Этими искрами он зарядил свои Лейденские банки и заставил их произвести электрический удар. Словом, он с молнией произвел все опыты, до того произведенные с искрой от электрической машины. Эти опыты опасны и не должны быть производимы неопытными лицами.

ментарным электрическим зарядом. Недавно была точно измерена величина этого заряда. Он содержит 2 095 000 000 единиц, определенных в § 280. Всякий элек-

трический заряд состоит из целого числа таких элементарных атомов электричества.

285. Заряжение через влияние. Подвесим на шелковых нитях два металлических шара или две яичных скорлупы A и B, покрытых тонкой металлической фольгой. Пусть они соприкоснутся, как на рис. 225. Затем поднесем к ним положительно заряженное тело C. Как уже было сказано выше, A и B сразу наэлектризуются. Это выразится в том, что положительно заряженный бузинный шарик оттолкнется от A и притянется к B. Если удалить C, в то время как A и B еще соприкасаются, их разъединившиеся заряды вновь соединяются, и они теряют свои электрические свойства. Но если удалить A от B, пока C еще находится вблизи них, A останется положительно заряженным, а B — отрицательно заряженным. Это можно проверить по их притягательному и отталкивающему действию на заряженную палочку или по их воздействию на заряженный электроскоп: при приближении одного из них листочки широко расходятся, при приближении другого они спадают.

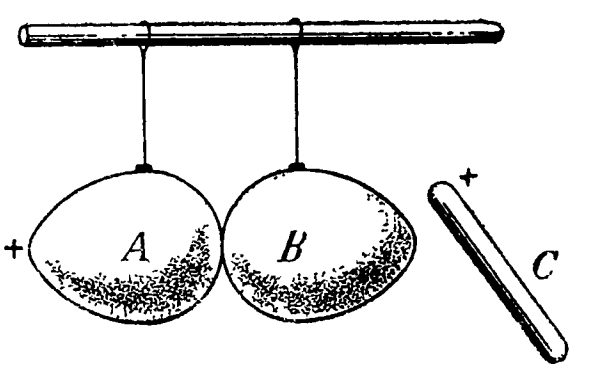


Рис. 225. Получение положительного и отрицательного заряда через индукцию.

Итак, мы видим, что, разрезая или деля на две части проводник, находящийся под влиянием электрического заряда, мы получаем два постоянно заряженных тела, причем более удаленная от индуцирующего заряда часть проводника оказывается заряженной электричеством того же знака, что и индуцирующий заряд, а более близкая — противоположным электричеством. Под влиянием положительного заряда C отрицательные электроны перешли из A в B, в силу чего A зарядилось положительно, а B — отрицательно.

Дотронемся пальцем до точки a изолированного проводника B (рис. 226), в то время как поблизости от него находится положительно заряженная палочка C. Затем сперва уберем с проводника палец, а потом удалим палочку C. Отрицательно заряженный бузинный шарик будет теперь отгалкиваться от B, показывая тем самым, что B зарядилось положительно. В этом опыте тело экспериментатора играло роль яичной скорлупы A из предыдущего опыта, а удаление пальца соответствовало разъединению двух яичных скорлуп.

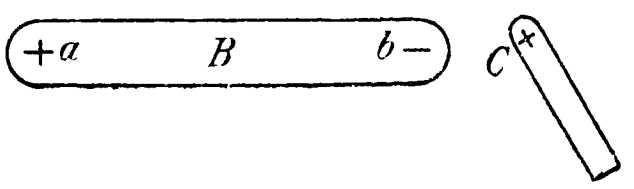


Рис. 226. Тело, заряженное через индукцию, имеет заряд, знак которого противоположен знаку индуцирующего заряда.

Повторим этот опыт с маленьким изменением, а именно: дотронемся до B в точке b, а не в точке a. Бузинный шарик покажет, что B опять-таки будет заряжен положительно, как и в прежнем случае.

Отсюда мы делаем следующий вывод: независимо от того, к какому именно месту изолированного тела B мы прикасаемся, знак остающегося на нем заряда всегда противоположен знаку индуцирующего заряда. Это объясняется тем, что отрицательное электричество, т. е. электроны, ни при каких обстоятельствах не могут покинуть B, пока вблизи находится C: их удерживает притяжение положительно заряженного C. Итак, почему же в конце концов B заряжается отрицательно?

Просто потому, что положительный заряд C оттягивает электроны от пальца, все равно, в каком бы мы месте ни прикасались к проводнику. И точно также, если бы C было заряжено отрицательно, его заряд отталкивал бы электроны от B, они уходили бы через палец, и B зарядилось бы положительно.

286. Заряжение электроскопа через влияние. Приблизим к шарику электроскопа стеклянную палочку, натертую шелком. Листочки сразу разойдутся (рис. 227, *1*). Дотронемся до шарика пальцем, не удаляя палочки. Листочки спадут (рис. 227, *2*). Уберем палец (рис. 227, *3*), а затем и палочку. Листочки опять разойдутся (рис. 227, *4*).

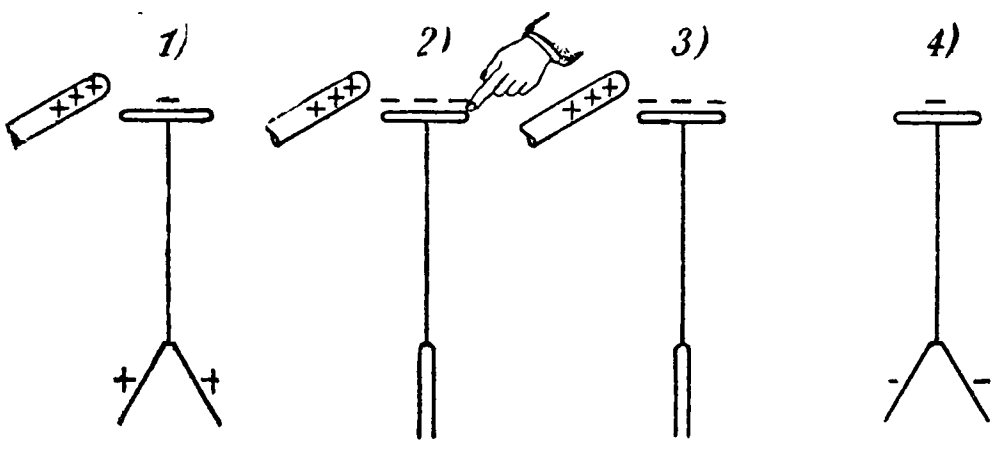


Рис. 227. Заряжение электроскопа через индукцию.

Теперь электроскоп заряжен и при том через влияние. И так как заряд палочки положителен, то заряд электроскопа должен быть отрицательным. Это легко проверить. Поднесем к электроскопу заряженную стеклянную палочку, листочки спадут. Это доказывает, что заряд электроскопа — отрицательный. При приближении руки к шарику электроскопа листочки спадают. Объясните, почему?

287. Положительное и отрицательное электричества всегда появляются в один и тот же момент и в одинаковых количествах. Разрядим эбонитовую палочку, быстро проведя ею по пламени бунзеновской горелки. Наденем на палочку фланелевый наконечник, снабженный шелковой ленточкой (рис. 228), и несколько раз быстро обернем наконечник вокруг палочки. Приближение палочки вместе с наконечником к электроскопу не вызовет никакого эффекта. Но, если снять наконечник, он окажется заряженным положительно, а на палочке окажется отрицательный заряд. Раз палочка с наконечником вместе никак не действовали на электроскоп, значит, в них положительное и отрицательное электричество находились в одинаковых количествах. Этот опыт опять-таки подтверждает уже высказанный выше взгляд, а именно, что электризация всегда является по существу разъединением положительного и отрицательного зарядов, уже находившихся в одинаковых количествах в теле, подвергнутом электризации.

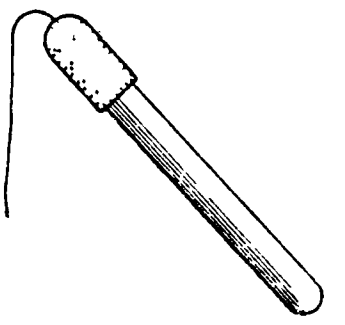


Рис. 228. Положительное и отрицательное электричество всегда появляется в одинаковых количествах.

Резюме. **Одноименные электрические заряды отталкиваются друг от друга, разноименные заряды — притягиваются. Электрический заряд, равный единице, есть заряд, отталкивающий равный и подобный ему заряд, находящийся на расстоянии 1 см, с силой в 1 дину.**

Нейтральное тело содержит одинаковые количества + и — электричества.

Чтобы тело зарядилось положительно (+), некоторая часть отрицательных электронов тела должна уйти из него. Чем больше электронов уйдет, тем больше будет положительный (+) заряд.

Чтобы тело зарядилось отрицательно (—), к нему должны перейти отрицательные электроны с какого-нибудь другого тела. Чем больше прибавится к телу электронов, тем больше будет его отрицательный заряд. Тело, заряжаемое через влияние, всегда получает заряд, противоположный по знаку заряда индуцирующего тела.

Когда на каком-нибудь теле появляется некоторый электрический заряд, всегда на каком-нибудь другом теле появляется равный ему, но противоположный по знаку заряд.

Вопросы и задачи.

1. Бузинный шарик, покрытый тонким листочком золота, подвешен на шелковой нити. Пока вблизи шарика находится положительно заряженная стеклянная палочка, шарик стремится приблизиться к палочке. Сделайте чертеж, иллюстрирующий электрические силы, действующие между шариком и палочкой.

2. Почему бузинный шарик притягивается, а не отталкивается от положительно заряженной стеклянной палочки?

3. Есть ли какая-нибудь аналогия между притяжением бузинного шарика к палочке — вследствие электрической индукции — и притяжением гвоздя к магниту — вследствие магнитной индукции. Объясните, отчего происходит притяжение в обоих случаях. Сделайте соответствующий рисунок.

4. Сделайте ряд рисунков, объясняющих шаг за шагом весь процесс заряжения электроскопа через индукцию с помощью отрицательно заряженной эбонитовой палочки.

5. При приближении положительно заряженной палочки к отрицательно заряженному электроскопу листочки его сблизились. Но при дальнейшем приближении положительно заряженной палочки листочки опять разошлись. Объясните, почему?

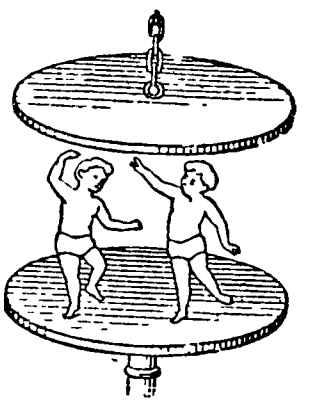


Рис. 229.

6. Положим, что у вас имеется электроскоп с золотыми листочками, стеклянная палочка и кусок шелка. Как бы вы поступили, чтобы определить знак неизвестного заряда?

7. Зарядите через индукцию электроскоп с золотыми листочками. Нагрейте кусок бумаги и проведите им по внешней поверхности электроскопа. Затем подержите этот кусок бумаги над заряженным электроскопом. Положим, что расхождение листочков электроскопа при этом увеличилось. Как была заряжена бумага, — положительно или отрицательно? А если расхождение уменьшилось, то каков знак заряда бумаги?

8. Поместим между двумя пластинками (рис. 229), одна из коих заземлена, а другая соединена с одним из кондукторов электрической машины, бузинные шарики или легкие фигурки. Во время действия машины фигурки будут двигаться взад и вперед. Объясните, почему?

9. Если держать в руках латунный стержень и при этом тереть его о шелк, он не наэлектризуется. Если же взять латунный стержень не прямо рукой, а обернуть его резиновой полоской и тогда натереть его шелком, он наэлектризуется. Объясните, почему?

10. Назовите как можно больше различий между магнитными и электрическими явлениями.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ НА ПРОВОДНИКАХ.

288. Электрические заряды находятся только на внешней поверхности проводников. Поместим на изолированной подставке высокий оловянный сосуд (рис. 230). Зарядим его как можно сильнее эбонитовой палочкой или с помощью электрической машины. Заставим теперь металлический шарик, висящий на шелковом шнурке, прикоснуться к внешней поверхности заряженного сосуда. Приблизим затем этот шарик к заряженному электроскопу, — мы обнаружим, что шарик сильно заряжен. Но, если бы шарик

прикоснулся к внутренней поверхности сосуда, мы не обнаружили бы на нем никакого заряда.

Из этого опыта ясно: электрический заряд целиком располагается на внешней поверхности проводника. Это можно объяснить себе так: все мелкие электрические заряды, из которых состоит весь заряд проводника, отталкивают друг друга. Поэтому они движутся по проводнику, пока, в среднем, не отодвинутся друг от друга по возможности дальше.

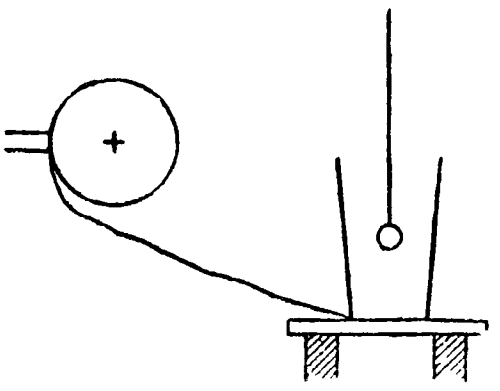


Рис. 230. Доказательство того, что заряд распределяется по поверхности.

289. Плотность заряда наибольшая в тех местах, где кривизна поверхности наибольшая. Все отдельные части электрического заряда взаимно отталкиваются и стремятся, по возможности, отдалиться друг от друга. Отсюда ясно: если поместить заряд на продолговатый проводник, изображенный на рис. 231, то он распределится по поверхности проводника так, что на концах проводник будет наэлектризован сильнее, чем посередине.

Это легко проверить. Возьмем какую-нибудь пробную пластинку, например, металлический кружок (хотя бы копейку), снабженный изолированной ручкой. Дотронемся этим кружком до одного из концов заряженного тела, затем сообщим этот заряд электроскопу и заметим, каково при этом расхождение его листочков. Потом повторим этот опыт, дотрогиваясь кружком до середины заряженного тела. В этом случае расхождение листочков будет гораздо слабее, чем в первом случае. Проверим теперь таким же способом, каково распределение заряда на грушевидном теле (рис. 231, 2). Оказывается, на остром конце плотность заряда гораздо больше, чем на широком. Плотностью заряда мы называем количество электричества, приходящееся на единицу площади поверхности.

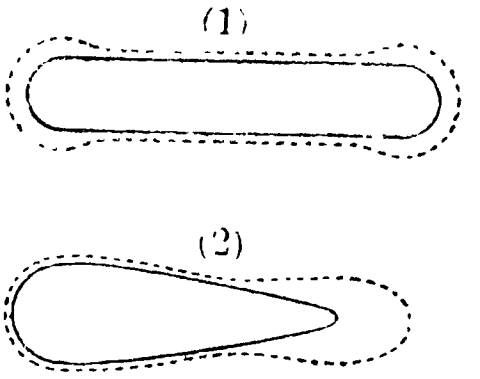


Рис. 231. Распределение заряда на продолговатых телах.

290. Истечение электричества из острия. Предшествующие опыты показывают, что если все более и более заострять один из концов грушевидного тела, то, при заряжении тела, плотность электричества на этом конце все более и более увеличивается. Посмотрим, что же будет, если снабдить проводник тонким острием.

Сделаем такой опыт. Прикрепим к гладкому изолированному металлическому телу очень тонкую иглу. Снабдим это тело индикаторами (указателями) в виде кусочков бумаги или бузинных шариков, как показано на рис. 224, стр. 199. Попробуем теперь заряжать это тело с помощью наэлектризованной палочки или электрической машины. Мы увидим, что сразу же после прекращения притока электричества к телу бумажные полоски или бузинные шарики немедленно спадут. Это значит, что тело потеряло свой заряд. Чтобы убедиться, что эта потеря действительно вызвана присутствием острия, уберем иголку и зарядим тело. Если теперь индикаторы и будут спадать, то чрезвычайно медленно.

Из этих опытов ясно, что плотность заряда на остриях так велика, что электричество стекает с них в окружающее пространство. Это объясняется тем, что сильно заряженное острие заставляет много молекул окружающего воздуха потерять один электрон. Благодаря

этому эти молекулы оказываются заряженными положительно. А свободные электроны прикрепляются к нейтральным молекулам и сообщают им таким образом отрицательный заряд. Одна часть этих заряженных молекул (так назыв. и о н о в) притягивается к острию, а другая — отталкивается от него. Те молекулы, которые притягиваются к острию, заряжены электричеством другого знака, чем острие и проводник. Долетая до проводника, они отдают ему свой заряд, т. е., другими словами, нейтрализуют заряд проводника.

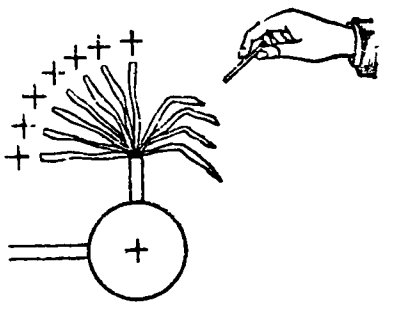


Рис. 232. Разряжающее действие острий.

Это же самое явление можно иллюстрировать и с помощью электроскопа. Зарядим электроскоп и на расстоянии нескольких сантиметров приблизим к его шарику иголку, держа ее в руках. Листочки электроскопа быстро сблизятся. Здесь иголка зарядилась через индукцию, а с нее заряд перешел к шарику электроскопа. Так как заряд иголки был противоположен по знаку заряду шарика, то он разрядился. А вот еще одно интересное видоизменение этого же опыта. Прикрепим к изолированному проводнику бумажный султан, т. е. стержень с шариком, к которому приклеены длинные полоски бумаги, и затем сильно наэлектризуем его. Полоски бумаги, под влиянием взаимного отталкивания, будут торчать в разные стороны. Но стоит приблизить к ним иголку, держа ее в руках, как полоски бумаги разрядятся и сблизятся (см. рис. 232).

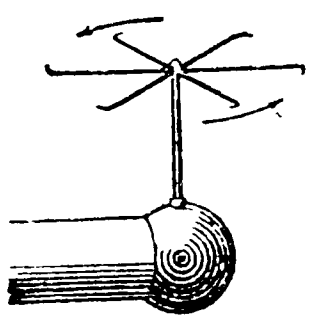


Рис. 233. Электрическая вертушка.

291. Электрическая вертушка. Сбалансируем электрическую вертушку на кончике булавки, прикрепленной к одному из кондукторов электрической машины. Во время действия машины вертушка будет все время быстро вертеться в направлении стрелок (см. рис. 233).

Это можно объяснить следующим образом: около каждого острия вертушки воздух и о н и з у е т с я, как уже было показано в § 290. Ионы, у которых знак заряда противоположен знаку заряда острия, притягиваются к этому острию и отдают ему свой заряд, а другая категория ионов отталкивается от острия. Но ведь отталкивание это взаимное. Поэтому острие отталкивается назад с такой же силой, с какой ионы толкаются вперед. Таким образом возникает вращение. Отталкиваемые ионы, в свою очередь, увлекают при своем движении воздух и производят э л е к т р и ч е с к и й в е т е р. Его легко обнаружить рукой или по отклонению пламени свечи (рис. 234).

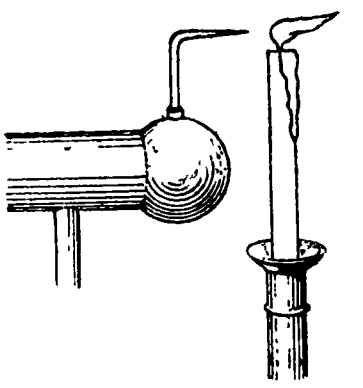


Рис. 234. Электрический ветер.

292. Молния и громоотвод. В 1752 г. Ф р а н к л и н (см. стр. 200) произвел во время грозы свой знаменитый опыт с воздушным змеем. На этом змее сверху была укреплена заостренная проволока. Как только пеньковая веревка змея сделалась мокрой, Франклину удалось получить обыкновенные электрические искры от ключа, привязанного к нижнему концу веревки. Этот опыт впервые показал, что грозовые облака несут на себе обыкновенные электрические заряды, которые можно извлекать с них с помощью острия и которые по смоченной дождем бечевке переходят в землю.

Далее. Из этого опыта видно, что молния есть не что иное, как гро-

мадная электрическая искра (см. стр. 209). Это открытие послужило Франклину для изобретения громоотвода. Громоотвод разряжает грозовое облако и защищает здания от удара молнии. Когда заряженное облако приближается к зданию, на котором имеется громоотвод, оно индуцирует в громоотвод заряд противоположного знака. Этот заряд быстро и спокойно стекает с острия громоотвода и нейтрализует заряд облака.

Для иллюстрации действия громоотвода сделаем такой опыт. Поместим металлическую пластинку C (рис. 235) над металлическим шаром E. Присоединим C и E к кондукторам электрической машины. Во время хода машины между C и E будет проскакивать искра. Но если соединить с E острие p, искры не будет. Т. е., острие p защитит E от разряда, даже если расстояние pE значительно больше расстояния CE.

Нижний конец громоотвода следовало бы зарывать в землю настолько глубоко, чтобы он всегда был окружен сырой землей: сухая земля — плохой проводник электричества.

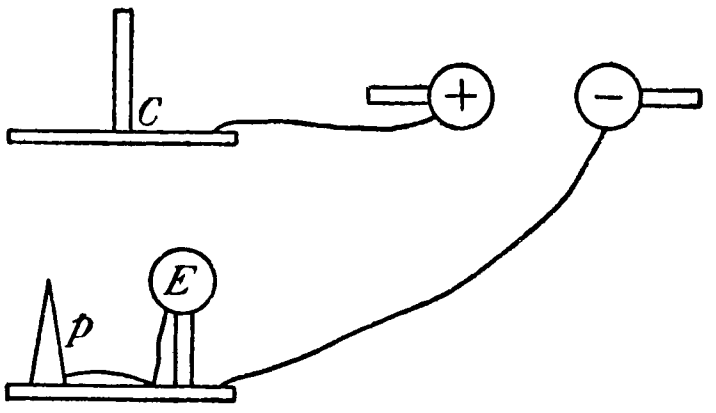


Рис. 235. Иллюстрация действия громоотвода.

Но громоотвод вовсе не потому защищает здания, что отводит молнию в землю: он препятствует образованию мощных зарядов вблизи здания, на котором он расположен. Молния часто достигает $1^1/_2 - 2$ *км* в длину (см. стр. 209). Гром происходит вследствие сильного расширения воздуха, нагревающегося на пути молнии. Раскаты грома вызваны отражением звука от гор, облаков и т. п.

Резюме. **Электрический заряд расположен на внешней поверхности проводника. Это объясняется взаимным отталкиванием одноименных частей заряда.**

Плотность электрического заряда наибольшая в местах с наибольшей кривизной. На остриях плотность заряда так велика, что ионизуется окружающий воздух.

Разряжающее действие острия основано на проводимости ионизированного воздуха, окружающего острие.

Громоотвод выполняет свое назначение благодаря разряжающему действию его острия.

Вопросы и задачи.

1. Будет ли заряд наэлектризованной сплошной сферы больше заряда наэлектризованной полой сферы такого же диаметра?
2. Сделайте рисунок, иллюстрирующий электрическое состояние башни непосредственно перед тем, как в нее ударяет молния. Пусть при этом грозовое облако сильно заряжено положительным электричеством.
3. Когда над домом, снабженным громоотводом, проходит отрицательно заряженное грозовое облако, острие громоотвода заряжается, ионизует воздух и тем самым уменьшает опасность от заряженного облака. Объясните, почему?

ПОТЕНЦИАЛ И ЕМКОСТЬ.

293. Разность потенциалов. Между «электрическим потенциалом» и «гидростатическим давлением» существует очень поучительная аналогия. Например. Когда вода из чана A течет по соединительной

трубке R в чан B (рис. 236), мы говорим, что гидростатическое давление в a больше, чем в b. И течение воды мы объясняем разностью этих давлений. Совершенно так же, когда два тела A и B (рис. 237) соединены проводящей проволокой r и положительный заряд переходит от A к B (т. е. если электроны идут от B к A), мы говорим, что электрический потенциал в A выше, чем в B, и мы считаем, что эта разность потенциалов является причиной течения электричества.[1]

Вода течет из мест с большим гидростатическим давлением в места с меньшим гидростатическим давлением. Точно также и электричество стремится перейти из мест с более высоким электрическим давлением, т. е. потенциалом, в места с более низким электрическим давлением, т. е. потенциалом.

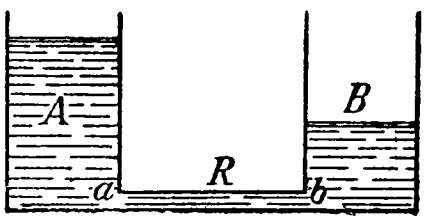


Рис. 236. Гидростатическое давление.

Далее. Если не добавлять воду в один из чанов A и B (рис. 236), давления a и b вскоре сделаются одинаковыми. Точно также: если не добавлять электричества к телам A и B (рис. 237), потенциалы их вскоре сделаются одинаковыми. Другими словами: потенциал всех точек системы, которая состоит из соединенных друг с другом проводников и в которой электричество находится в стационарном, или статическом, состоянии, — одинаков. Это непосредственно следует из того, что электрические заряды могут двигаться по проводникам.

Но если все время доливать в A воду и в то же время давать ей вытекать из B (рис. 236), давление в a все время будет выше давления в b, и через R все время будет струиться поток воды.

И точно также: если A (рис. 236) соединено с электрической машиной, а B — с землей, то между A и B все время будет существовать разность потенциалов, и по r будет итти постоянный электрический ток. Будем обозначать разность потенциалов просто буквами p. n.

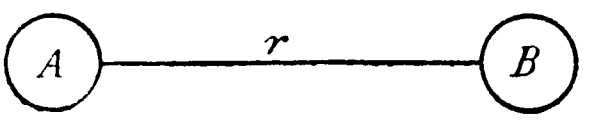


Рис. 237. Электрическое давление.

294. Некоторые способы измерения потенциалов. Самый простой способ измерить разность потенциалов между двумя телами состоит в том, что одно тело присоединяют к шарику, а другое — к проводящей камере [2] электроскопа.

Степень расхождения золотых листочков является мерой p. n.

---

[1] Франклин думал, что по проводнику движется положительное электричество и что отрицательное электричество неразрывно связано с атомами. Поэтому всегда условно считают, что электричество движется в том направлении, в котором двигался бы положительный заряд, производящий такой же эффект. Было бы нежелательно изменить теперь это условное обозначение, хотя электронная теория и показала, что в действительности дело происходит как раз наоборот: положительные заряды неразрывно связаны с атомами, а отрицательные заряды (электроны) движутся по проводнику.

[2] Если камера стеклянная, ее всегда надо изнутри обкладывать станиолем, начиная с высоты листочков и донизу, так, чтобы станиоль снизу выходил на наружную поверхность камеры и соприкасался с проводящей подставкой электроскопа. Это делается для того, чтобы потенциал стенок камеры всегда был равен потенциалу земли.

между телами. Обыкновенно *p. n.* выражают в единицах, называющихся в о л ь т а м и. Точное определение вольта будет дано в § 335. Пока же мы ограничимся указанием, что вольт приблизительно равен электрическому давлению между цинковой и медной пластинками, погруженными в раствор серной кислоты, или $^2/_3$ электрического давления между цинковым и угольным электродом обыкновенного сухого элемента.

Земля в целом является хорошим проводником. Поэтому потенциал ее повсюду один и тот же (§ 293). В виду этого, потенциал земли удобно считать за некоторую отправную точку при измерении потенциалов различных тел. Чтобы найти потенциал какого-нибудь тела по отношению к потенциалу земли, мы соединяем внешнюю камеру электроскопа с землей, а тело — с шариком электроскопа. Если электроскоп калибрирован на вольты, то его показания прямо дают нам *p. n.* между телом и землей. Такой калибрированный электроскоп называется э л е к т р о с т а т и ч е с к и м в о л ь т м е т р о м. Это — самый простой и во многих отношениях самый удовлетворительный вид вольтметра. Они находят себе все более и более широкое применение как в лабораторной практике, так и на электрических силовых станциях. С их помощью можно измерять *p. n.* от $\frac{1}{1000}$ вольта до 200 000 вольт. На рис. 238 изображен один из простейших видов электрического вольтметра. Внешняя камера — металлическая и соединена с землей в точке *a*. Тело, потенциал которого надо определить, соединяется с шариком *b*. Этот шарик соединен с легкой алюминиевой стрелкой *c*, заменяющей здесь золотой листочек.

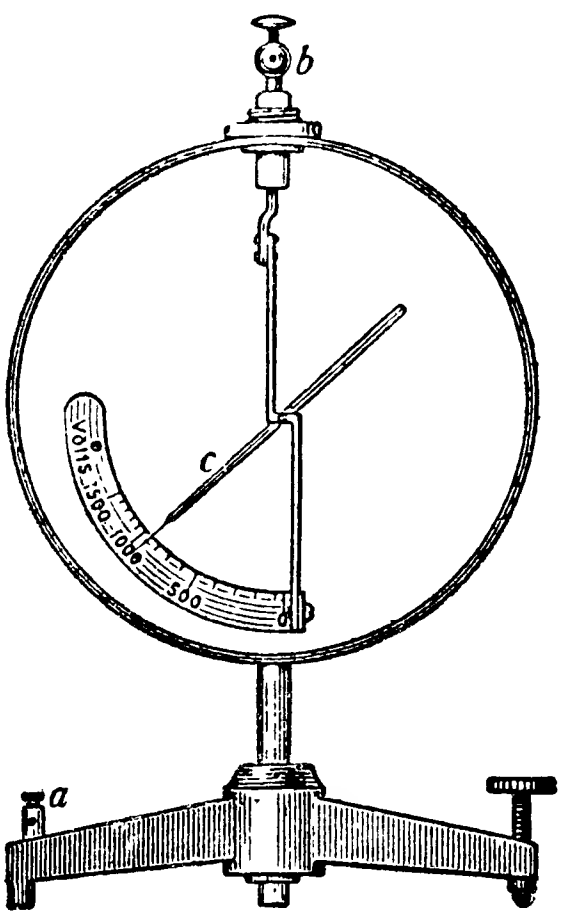
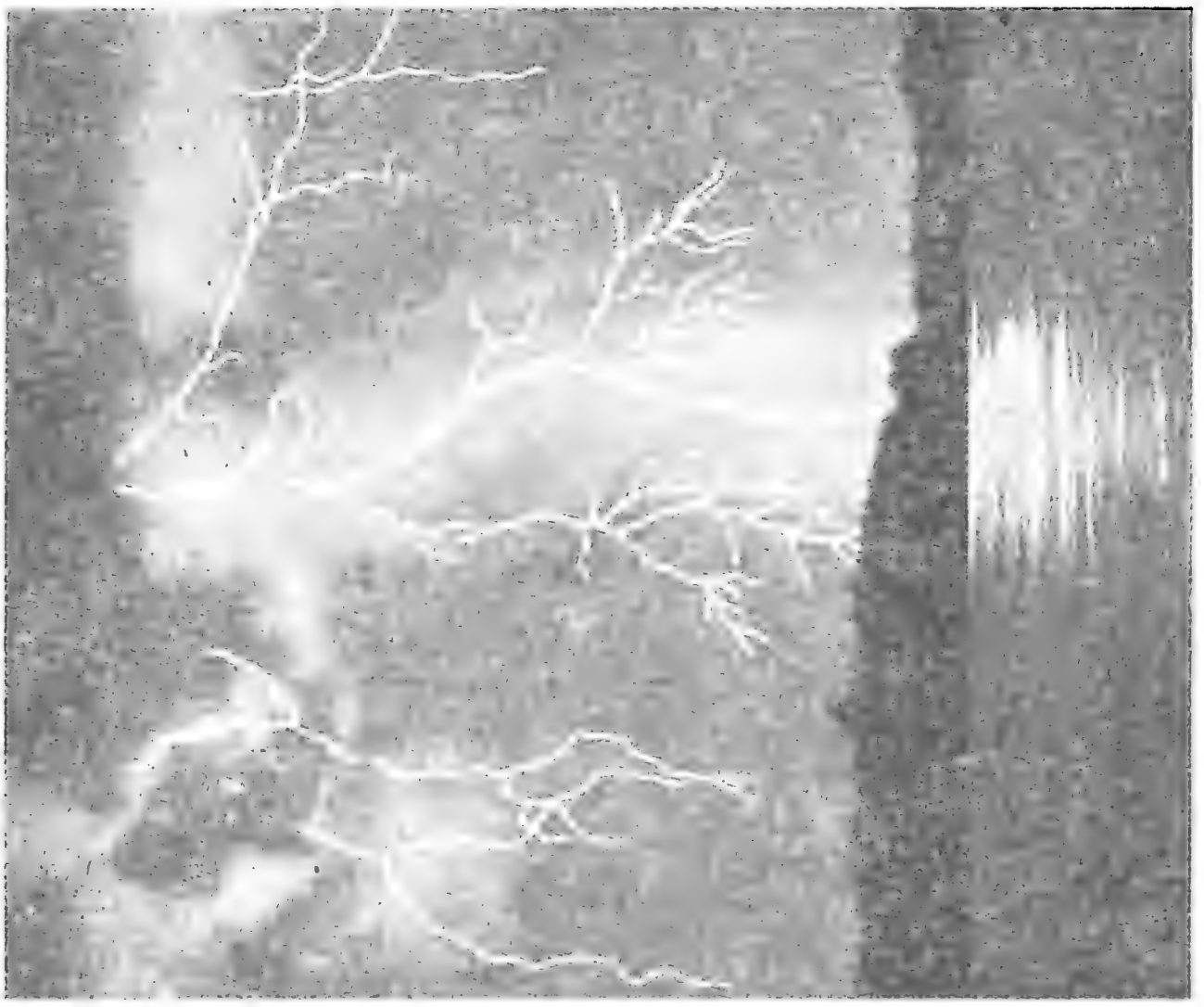


Рис. 238. Электростатический вольтметр.

Б о л ь ш у ю разность потенциалов можно измерять без вольтметра, по длине искры, проскакивающей между обоими телами, *p. n.* которых ищут. *P. n.*, грубо говоря, пропорциональна длине искры. Каждый сантиметр длины искры означает, примерно, 30 000 вольт, если электроды достаточно велики по сравнению с расстоянием между ними.

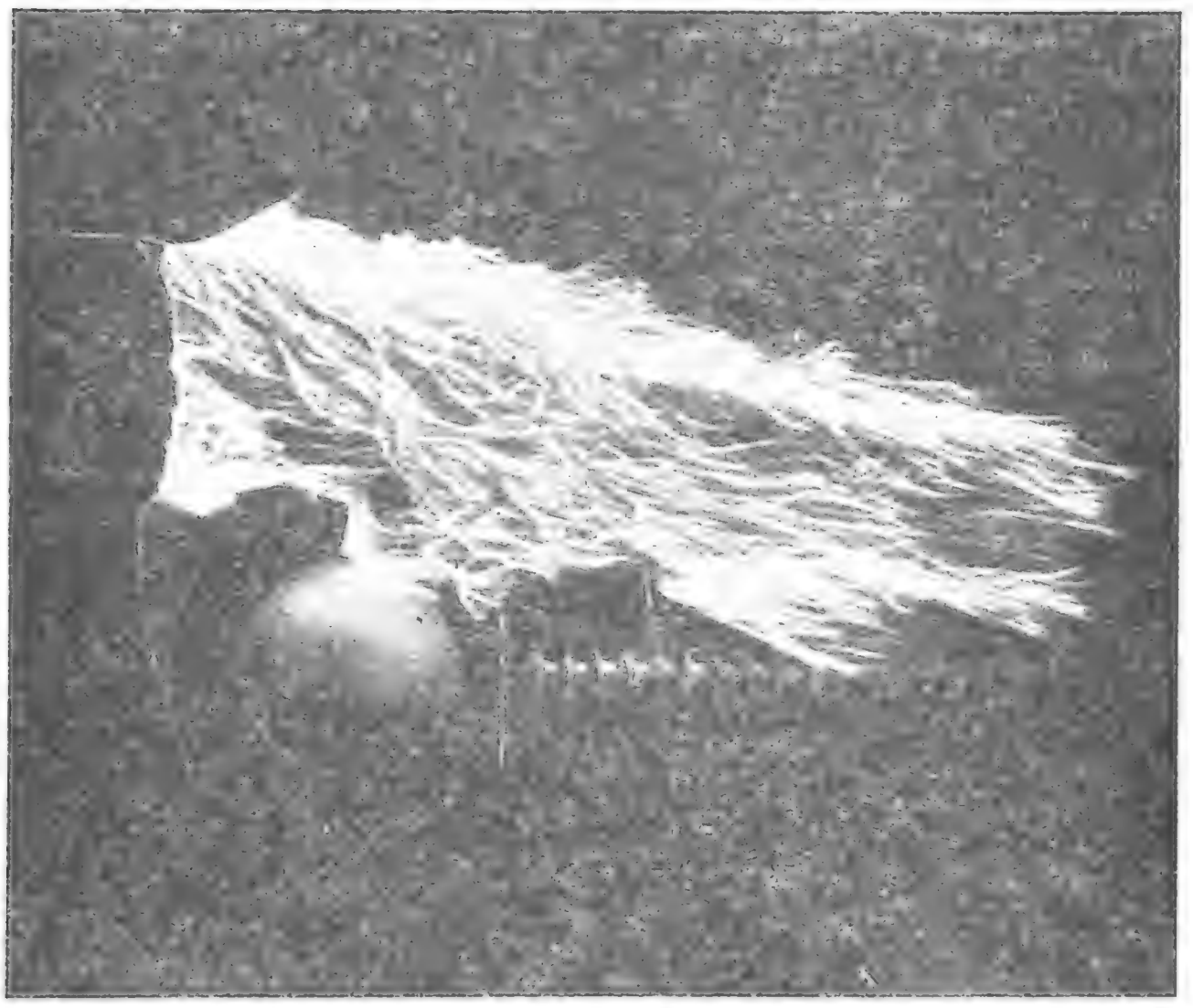
295. Конденсаторы. Установим металлическую пластинку *A* на изолированной подставке. Соединим ее с электроскопом, как показано на рис. 239. Установим таким же образом вторую пластинку *B* и соединим ее с землей с помощью проводящей проволоки. Зарядим *A* и заметим расхождение золотых листочков. Будем приближать *B* к *A*. Мы увидим, что по мере приближения *B* к *A* листочки электроскопа начнут сближаться. Это значит, что потенциал *A* уменьшился под влиянием присутствия *B*, хотя количество электричества на *A* не изменилось. Будем теперь сообщать *A* с помощью пробной пластинки дополнительные отрицательные заряды. Мы увидим, что теперь придется сообщить *A* количество электричества, во много раз превосходящее его первоначальный заряд, пока расхождение листочков электроскопа достигнет первоначальной величины, т. е. пока потенциал тела сделается опять равным его первоначальному потенциалу.

Поэтому говорят, что электрическая емкость A сильно возрастает при приближении к нему другого проводника, соединенного



ИСКУССТВЕННАЯ МОЛНИЯ В МИЛЛИОН ВОЛЬТ.

Диаметр шара 30 *см*

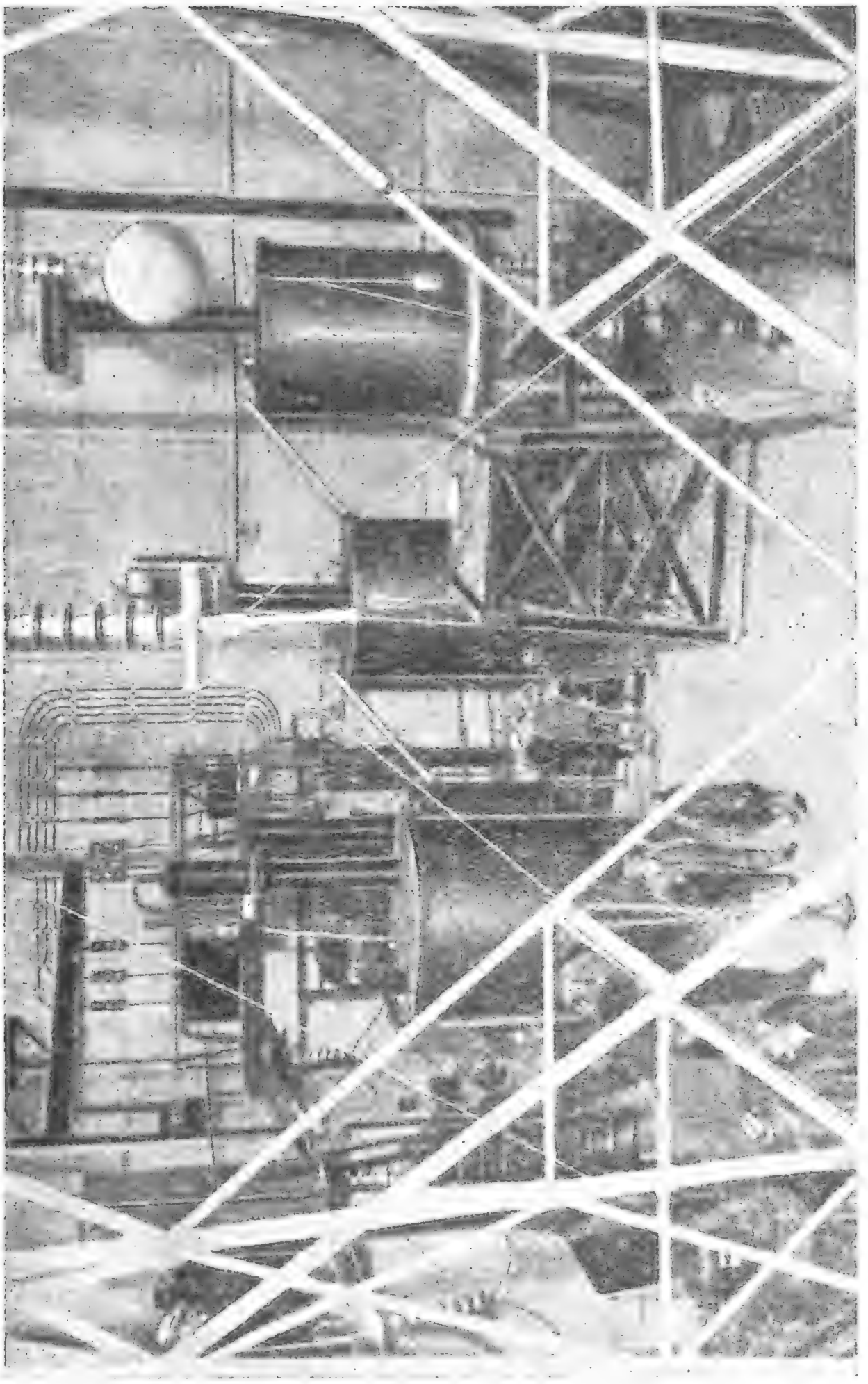


ЕСТЕСТВЕННАЯ МОЛНИЯ

с землей. Отсюда ясно, что емкость тела измеряется количеством электричества, которое необходимо сообщить телу, чтобы повысить его

потенциал на некоторую определенную величину. Очень легко понять причину увеличения емкости тела в нашем опыте.

Когда *B* приблизилось к *A*, оно зарядилось через индукцию электричеством противоположного знака. А электричество того же знака, что и на *A*, оттолкнулось и ушло в землю по проводящей проволоке.



ТРАНСФОРМАТОР В МИЛЛИОН ВОЛЬТ.

Лаборатория в 1 000 000 вольт, 1000 киловатт, где была получена изображенная на предыдущей странице искусственная молния. Миллион вольт получаются от 4-х трансформаторов по 250 000 вольт каждый, соединенных каскадно.

Притяжение между разноименными зарядами на *A* и на *B* заставило заряд *A* перейти к поверхности, ближайшей к *B*, и покинуть более удаленную от *B* поверхность *A*. Поэтому-то теперь на *A* нужно было поместить гораздо бóльший заряд, чем раньше, чтобы электричество с *A* стало переходить на электроскоп в такой же степени, как и раньше, т. е. чтобы потенциал *A* достиг своей первоначальной вели-

чины. В таких случаях говорят, что электричество на A удерживается противоположным электричеством на B.

Такой прибор, состоящий из двух проводников, разделенных непроводником, называется конденсатором. Если расстояние между пластинами конденсатора очень мало и одна из них заземлена, емкость этой системы может быть в тысячи раз больше емкости каждой пластины в отдельности.

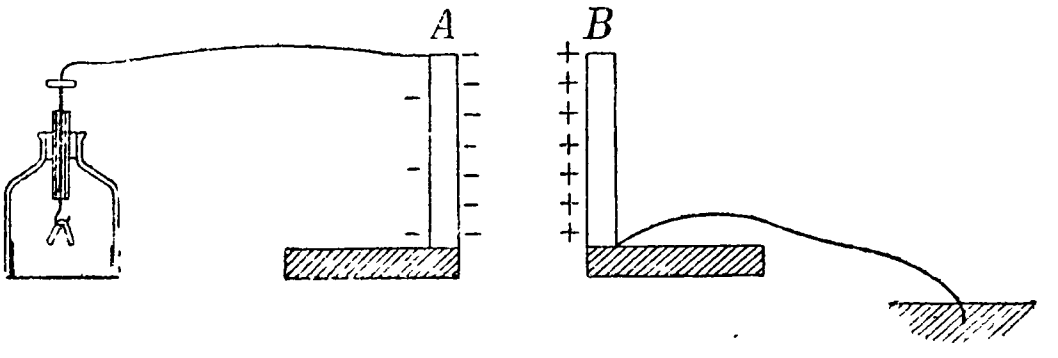


Рис. 239. Принцип конденсатора.

296. Лейденская банка. Самый распространенный вид конденсатора — это стеклянный сосуд, снаружи и изнутри оклеенный более чем до половины станиолем (рис. 240). Внутренняя обкладка посредством цепочки, спускающейся с металлического прута, воткнутого в пробку, соединяется с шариком, находящимся на другом конце этого прута. Наружная обкладка соединяется с землей. Конденсаторы такого вида впервые вошли в употребление в Лейдене, в Голландии, в 1745 г. Поэтому их и называют теперь лейденскими банками.

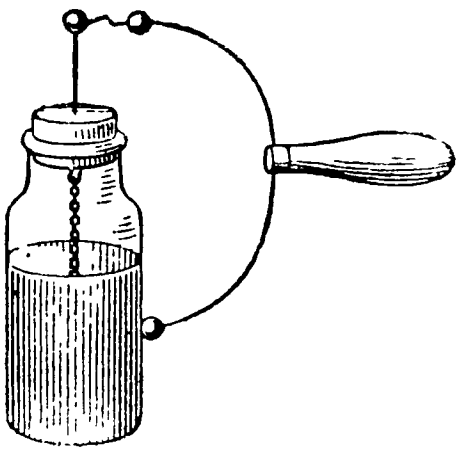


Рис. 240. Лейденская банка.

Лейденская банка заряжается следующим образом. Ее берут рукой за наружную обкладку, а внутреннюю обкладку соединяют с одним из кондукторов электрической машины, например, с отрицательным Электроны распространяются по внутренней обкладке и отталкивают электроны с наружной обкладки в землю. Таким образом на наружной обкладке появляется положительный заряд. Если теперь соединить внутреннюю и наружную обкладку разрядником (как на рис. 240), мы получим мощную искру. Эта искра появляется вследствие перехода электронов с отрицательной обкладки на положительную. Поместим заряженную банку на стеклянную пластинку так, чтобы наружная обкладка была изолирована. Дотронемся пальцем до шарика. Мы не заметим никакого разряла. Теперь дотронемся пальцем до наружной обкладки. Опять не появится никакого заметного разряда. Но если соединить разря ником внутреннюю и наружную обкладки, проскочит мощная искра.

Этот опыт показывает, что невозможно разрядить отдельно какую-нибудь одну обкладку банки: дело в том, что весь заряд каждой обкладки сдерживается противоположным зарядом на другой обкладке. Поэтому полный разряд может произойти только при соединении внутренней и наружной обкладок.

Лейденские банки и другие виды конденсаторов имеют громадное практическое значение. Ими пользуются, например, в некоторых системах телефона и телеграфа, в беспроволочной телеграфии и телефонии, в электрических машинах и в индукционных катушках. Рис. 241 изображает радио - конденсатор. Его емкость можно менять вращательным движением. При этом две серии пластин его сближаются или удаляются друг от друга.

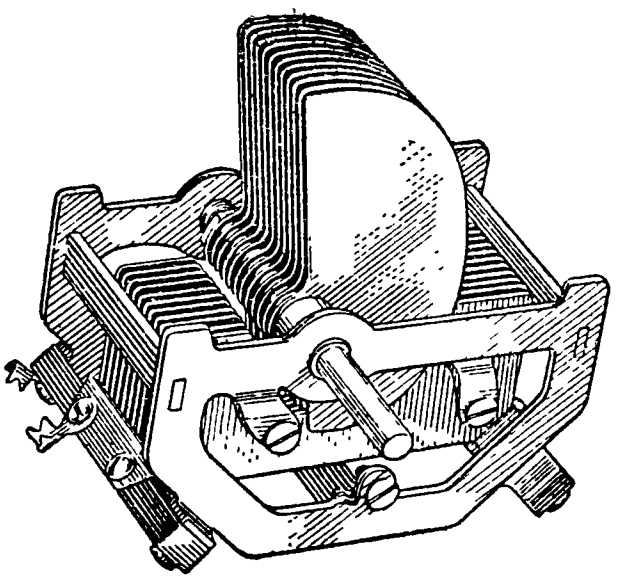


Рис. 241. Переменный радиоконденсатор.

297. Электрофор. Электрофор — это простой электрический генератор, изобретенный Вольтой в 1777 г. Он хорошо иллюстрирует принцип, на котором основана электрическая машина. Все такие машины генерируют (порождают) электричество не посредством трения, а посредством индукции. *B* (см. рис. 242) представляет собою каучуковый круг, который трением о мех или фланель заряжают отрицательным электричеством. *A* — металлический диск, снабженный изолированной ручкой. Диск *A* кладут на *B*, дотрогиваются до него пальцем и затем снимают с *B*. После этого из диска *A* можно извлечь искру, достигающую в сухую погоду 0,5 *см* и более в длину. Этот процесс наложения металлического диска на каучуковый круг, касания его пальцем и удаления с каучукового круга можно повторять сколько угодно раз, причем металлический диск каждый раз будет заряжаться, и размер искры, извлекаемой из него, не уменьшается.

Посредством электроскопа можно убедиться в том, что диск *A* заряжается положительно. Это значит, что *A* заряжается через индукцию, а не через соприкосновение с *B*, ибо *B* заряжено отрицательно. Дело тут в том, что хотя *A* и лежит на *B*, он все же отделен от *B* изолирующим слоем воздуха. Правда, в некоторых очень немногих точках *A* соприкасается с *B*. Но так как каучуковый диск *B* — непроводник, то он не может потерять сколько-нибудь значительного количества электричества через эти немногие точки соприкосновения. *B* только отталкивает электроны к верхней поверхности металлического диска *A* и таким образом заряжает его нижнюю поверхность положительно. Когда мы дотрогиваемся пальцем до *A*, электроны с него уходят в землю. Поэтому, после того как мы убираем палец и приподнимаем *A*, на нем оказывается сильный положительный заряд. Всякая коммерческая электростатическая машина является просто-напросто постоянно действующим электрофором, генерирующим электричество посредством индукции, а не посредством трения.

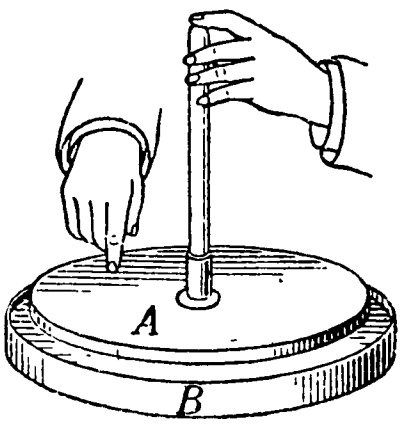


Рис. 242. Электрофор.

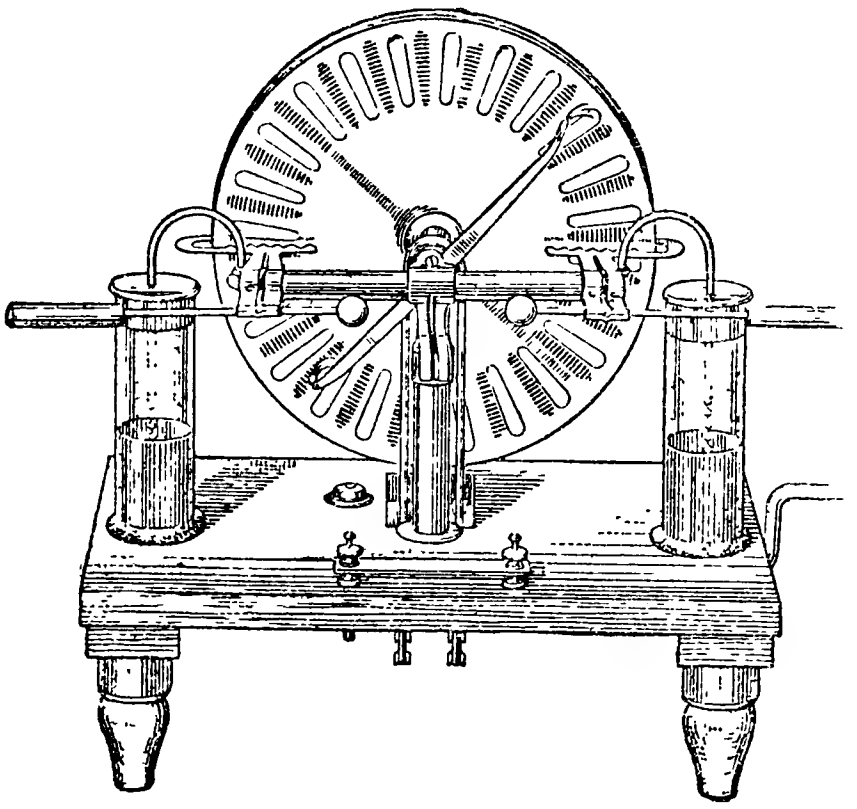


Рис. 243. Индукционная машина Уимсхёрста.

298. Электрическая машина Уимсхёрста. Обыкновенная электростатическая машина — не что иное, как постоянно действующий электрофор. На рис. 243 изображена электрическая машина Уимсхёрста. Устроена она так: две пластины вращаются в противоположных направлениях. На этих пластинах имеется множество станиолевых полосок. Действие машины легко понять из рис. 244. Положим, что на *A* помещен небольшой

отрицательный заряд. Этот заряд оказывает индуцирующее действие на стержень *rs* и тем самым заряжает *a'* отрицательным электричеством. Когда *a'*, в процессе вращения, достигает положения *b'*, оно оказывает индуцирующее действие на стержень *s' r'* и заряжает диск *b* отрицательно. Итак, легко видеть, что все диски, расположенные на внутренней окружности, проходя мимо щетки *r*, получают положительные заряды. А все диски внешнего круга (т. е. находящиеся на задней пластине) получают отрицательные заряды, проходя мимо щетки *S'*. Точно так же в нижней половине все внутренние диски, проходя мимо щетки *s*, получают отрицательные заряды, а диски внешнего круга — положительные заряды, при прохождении мимо щетки *r'*.

Когда положительно заряженные внутренние диски оказываются против гребенок *c*, заряды их переходят на положительный кондуктор машины или на соединенную с машиной лейденскую банку. Тот же процесс происходит и на другой стороне, где снимаются отрицательные заряды. После того как проскочит искра, лейденская банка и при оединенная к ней система проводников приходят опять в первоначальное состояние, и процесс начинается сызнова.

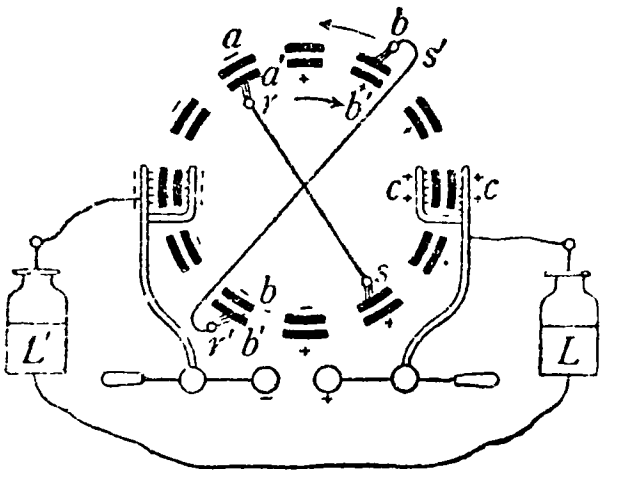


Рис. 244. Принцип машины Уимсхёрста.

Резюме. **Разность потенциалов играет в электрическом потоке ту же роль, что разность давлений в потоке жидкости. Р. п. можно измерять 1) калиброванным электроскопом, или электростатическим вольтметром, или 2) по длине разрядной искры.**

Конденсатор состоит из двух проводников, отделенных друг от друга непроводником. Емкостью конденсатора называется отношение его заряда к р. п. между его пластинами.

Электрофор и электростатическая машина суть электростатические генераторы. Действие их основано на электростатической индукции.

Вопросы и задачи.[1]

1. Почему нельзя сколько-нибудь сильно зарядить лейденскую банку, если ее наружная обкладка изолирована?
2. Поставьте заряженную лейденскую банку на кусок парафина. Почему вы не можете разрядить ее, дотрогиваясь до одной из ее обкладок?
3. Объясните с помощью чертежей, как заряжается верхняя пластина электрофора.
4. Почему емкость проводника больше, когда вблизи него имеется другой проводник, соединенный с землей?

ГЛАВА XIV.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО В ДВИЖЕНИИ.

ОБНАРУЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА.

299. Электричество в движении производит магнитные действия. Разрядим сильно заряженную лейденскую банку через катушку, внутри которой помещена ненамагниченная вязальная спица, заключенная для изоляции в стеклянную трубку (см. рис. 245); вблизи находится в покое компасная стрелка, помещенная как показано на том же рисунке. После разряда вязальная спица окажется заметным образом намагниченной. При перемене знака заряда банки на противоположный, полюсы вязальной спицы также изменят свои знаки на противоположные, а компасная стрелка отклонится теперь в противоположном направлении.

[1] Дополнительные вопросы и задачи к главе XIII приведены в приложении.

Опыт, таким образом, показывает, что существует определенная связь между электричеством и магнетизмом. Истинная природа этой связи неизвестна нам с полной достоверностью; однако мы знаем, что магнитные действия всегда наблюдаются вблизи движущегося электрического заряда, между тем как покоящийся заряд подобных действий не вызывает.

Поднесем заряженное тело к компасной стрелке. Оно будет одинаково сильно притягивать любой из концов стрелки. После того как стрелка отклонится и установится в своем новом положении, поместим между нею и заряженным телом пластинку из цинка, алюминия, латуни или меди; такая пластинка будет служить нам электрическим экраном, т. е. она защитит стрелку от действия заряда: стрелка сразу же качнется обратно и установится в своем обычном положении, указывая одним концом на север, а другим на юг.

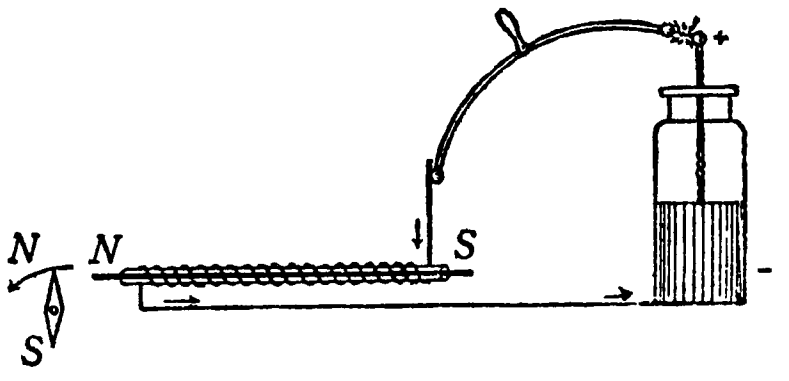


Рис. 245. Магнитное действие электрического тока, полученного от статического заряда.

Отклоним теперь компасную стрелку постоянным магнитом и снова поместим экран между магнитом и стрелкой. Металлическая пластинка не защищает стрелку от действия, производимого на нее магнитными силами.

Таким образом, покоящийся электрический заряд не производит магнитного действия; в самом деле, он одинаково сильно притягивает оба конца компасной иглы и, кроме того, металлический экран полностью защищает стрелку от действия на нее покоящегося заряда; между тем тот же самый экран не оказывает ни малейшего влияния на действие, производимое магнитной силой.

Движущийся электрический заряд называется электрическим то́ком; его присутствие обычно обнаруживают по производимому им магнитному действию. Электрический ток представляет собой поток отрицательных электронов (см. примечание к § 293, стр. 207).

300. Гальванический элемент. При разряде лейденской банки через соединительные провода проходит весьма малое количество электричества, так как промежуток времени, в течение которого проходит ток, составляет ничтожно малую долю секунды.

Если бы удалось заставить ток непрерывно протекать по проволоке, то можно было бы ожидать и значительно более сильного магнитного действия. В 1786 г. в Болонском университете итальянский анатом Гальвани случайно открыл химический способ получения подобного рода непрерывного тока. Его открытие однако не было оценено до тех пор, пока Вольта, занимаясь исследованием того же самого явления, не изобрел в 1800 г. источник тока, известный под названием вольтаического или гальванического элемента. Последний, в своем простейшем виде, состоит из медной и цинковой полосок, погруженных в слабый раствор серной кислоты (рис. 246).

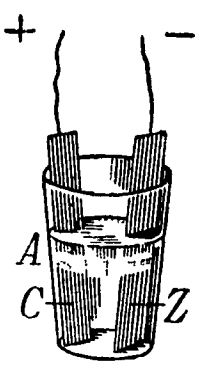


Рис. 246. Простой гальванический элемент.

Присоединим зажимы такого элемента на несколько секунд к концам катушки (рис. 245), которая окружает ненамагниченную спицу, помещающуюся внутри стеклянной трубки. Спица окажется значительно более сильно

намагниченной, чем раньше, Далее, поднесем проволоку, соединяющую зажимы элемента, к компасной игле, как показано на рис. 247; игла испытает сильное отклонение.

Очевидно, что через проволоку, соединяющую зажимы гальванического элемента, проходил электрический ток. Исторически второй из этих опытов, произведенный в 1820 г. датским физиком Эрстедом предшествовал открытию намагничивающего действия тока на стальную иголку. Он вызвал большое удивление и восхищение современников, потому что явился первым ключом к раскрытию связи между электричеством и магнетизмом.

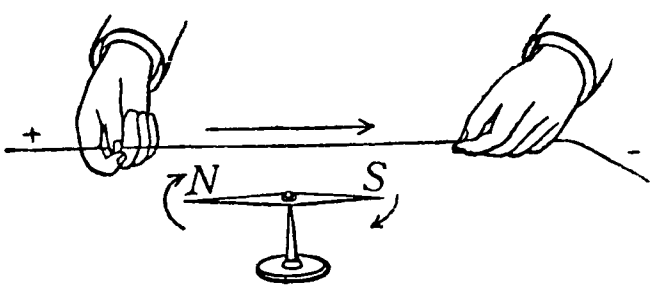


Рис. 247. Опыт Эрстеда.

301. Пластинки гальванического элемента обладают электрическим зарядом. Так как электрический ток начинает проходить по проволоке сразу же, после того как ее приводят в соприкосновение с цинковой и медной полосками гальванического элемента, то мы отсюда заключаем, что зажимы такого элемента обладали электрическим зарядом, до того как они были соединены. Доказать это можно следующим образом.

Возьмем металлический диск A (рис. 248), покрытый с одной стороны шеллаком (изолирующим составом) и снабженный изолирующей ручкой; поместим его на такой же диск B, соединенный со стержнем электроскопа. Далее присоединим медную пластинку гальванического элемента к A и цинковую пластинку к B (см. рис. 248). Удалим затем соединительные проволочки и снимем диск A с B. Противоположные электрические заряды, которые благодаря взаимному притяжению удерживались у соприкасающихся сторон A и B, до тех пор, пока эти стороны были отделены только тонким слом шеллака, теперь после удаления диска A получили свободу, и поэтому часть заряда диска B перейдет на листочки электроскопа. Последние при этом разойдутся. Если поднести к электроскопу эбонитовую палочку, натертую флапелью или кошачьим мехом, то листочки разойдутся еще больше, обнаруживая таким образом, что цинковая пластинка гальванического элемента заряжена отрицательно. Если повторить опыт, соединив медную пластинку с диском B, а цинковую с диском A, то окажется, что листочки заряжены положительно. [1]

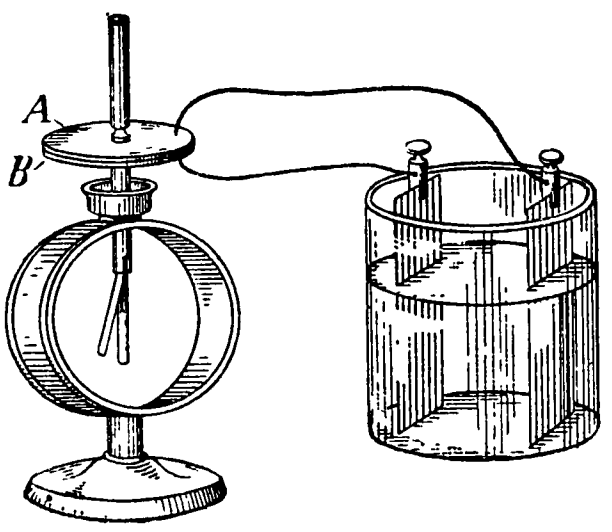


Рис. 248 Опыт, обнаруживающий присутствие зарядов на пластинах гальванического элемента.

Таким образом, зажимы гальванического элемента несут положительные и отрицательные заряды точно так же, как зажимы приведенной в действие электрической машины. Положительный заряд всегда оказывается на меди, отрицательный заряд — на цинке. Источником этих зарядов являются химические действия внутри элемента. Если соединить зажимы элемента проводником, то через последний потечет электрический ток так же, как и в случае электрической машины; принято считать, что электрический ток идет от

[1] Если отклонение листочков слишком мало, возьмите вместо одного элемента батарею из 5—10 элементов. Однако, если диаметр дисков A и B равен 7—10 *см*, а поверхности их достаточно ровные, то вполне достаточно одного элемента.

положительного зажима генератора, или источника тока, через внешнюю цепь к отрицательному зажиму, т. е. в нашем случае ток вне элемента идет от меди к цинку (см. § 293 и примеч.)

ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ.

В верхнем правом углу рисунка — первый электромагнит. Он был сконструирован в Принстоне в 1828 г. Джозефом Генри. Он намотал на U-образном куске железа несколько рядов проволоки, изолированной шелком. Основная часть рисунка — гигантский, современный магнит, весящий 4360 *кг*, имеющий около 2 *м* в диаметре. Он имеет 118 000 ампер-витков, по нем идет ток в 84 ампера при 220 вольтах. Обмотка его состоит из ряда медных полос, изолированных друг от друга асбестовыми прокладками. Магнит нагружает товарный вагон чугунными болванками, весящими в среднем по 2 000 *кг* каждая.

302. Сравнение гальванического элемента и статической машины. Если одним из зажимов гальванического элемента коснуться непосредственно стержня электроскопа с золотым листочком в отсутствии дисков конденсатора A и B (см. рис. 248), то отклонение ли-

сточков при этом не удастся обнаружить; если же коснуться электроскопом одного из стержней работающей статической машины, то листочки разойдутся настолько сильно, что, пожалуй, даже отлетят в разные стороны. Мы видели в § 294, что расстояние, на которое расходятся золотые листочки, служит мерой потенциала того тела, к которому они присоединены; наш опыт показывает, что химические действия в гальваническом элементе способны создать между его зажимами разность потенциалов, которая весьма мала по сравнению с разностью потенциалов, создаваемой между зажимами статической машины. Действительно, разность потенциалов между зажимами элемента составляет около одного вольта, в то время как между стержнями электрической машины можно получить свыше 200 000 вольт.

Однако, если присоединить стержни статической машины к концам проволоки, изображенной на рис. 247, и привести машину в действие, то ток, который пойдет по проволоке, будет недостаточен для того, чтобы произвести сколько-нибудь заметное действие на компасную иглу. Так как при тех же самых обстоятельствах гальванический элемент производил весьма большое действие на иглу, мы отсюда заключаем, что хотя элемент и создает между своими зажимами весьма малую разность потенциалов, он однако посылает по проволоке значительно больше электричества в секунду, чем статическая машина. Объясняется это тем, что в гальваническом элементе пластинки вновь заряжаются до своей малой разности потенциалов практически с той же самой скоростью, с которой они разряжаются через проволоку, между тем как в случае статической машины требуется относительно длинный промежуток времени для того, чтобы вновь зарядить ее зажимы до высокой разности потенциалов.

Резюме. **Движущийся электрический заряд создает магнитное поле вокруг проводника, по которому он проходит.**

Гальванический элемент, подобно статической машине, создает на своих зажимах положительные и отрицательные заряды. Элемент дает сильные токи при малых напряжениях; статическая машина — слабые токи при высоких напряжениях.

Вопросы и задачи.

1. При каких условиях электрический заряд производит магнитное действие?
2. Каким образом можно узнать, течет ли по проволоке ток или нет?
3. Чем отличается ток, создаваемый элементом, от тока, получаемого от статической машины?
4. Укажите три признака сходства между поведением магнитов и электрических зарядов и два признака различия между ними.

ХИМИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ ТОКА; ЭЛЕКТРОЛИЗ.

303. Электролиз. Погрузите два платиновых электрода в разбавленный раствор серной кислоты и соедините с этими электродами зажимы батареи гальванических элементов напряжением в 10 вольт или больше. При этом окажется, что на том электроде, через который ток входит в раствор и который называется анодом (+), выделяется газ кислород, а на электроде, через который

ток выходит из раствора и который называется катодом (—), выделяется водород. Эти газы можно собрать в пробирки, как показано на рис. 249.

Если смешать серную кислоту с таким количеством воды, чтобы она образовала разбавленный раствор, то каждая молекула H_2SO_4 расщепится на три заряженные электричеством части, называемые ионами, а именно на два водородных иона, обладающих положительным зарядом, и на ион SO_4, несущий двойной отрицательный заряд (рис. 250); это явление называется электролитической диссоциацией. Раствор в целом электрически нейтрален, так как он содержит одинаковое количество положительных и отрицательных зарядов.

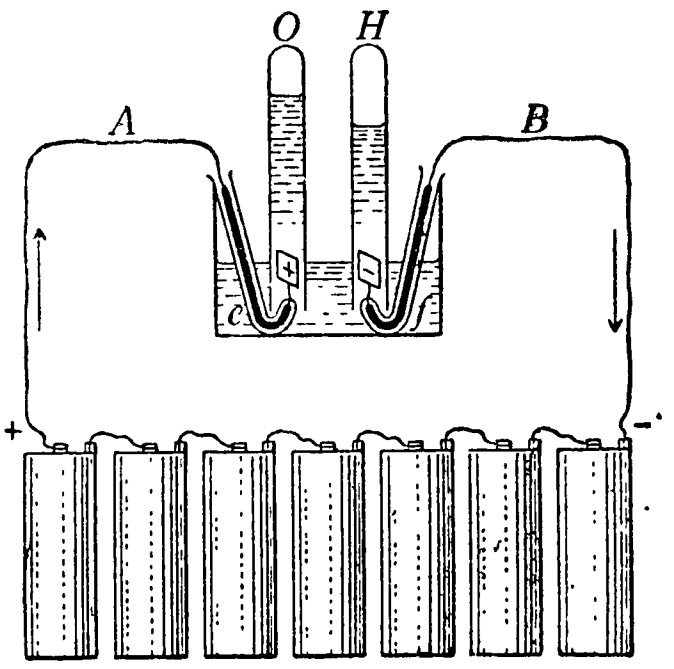


Рис. 249. Электролиз воды.

После того как при соединении электродов с положительным и отрицательным зажимами батареи внутри раствора устанавливается электрическое поле, водородные ионы начинают странствовать по направлению к отрицательному электроду (т. е. к катоду) и, там отдав свои заряды, соединяются и образуют молекулы газа водорода. С другой стороны, отрицательные ионы SO_4 путешествуют к положительному электроду (т. е. к аноду), где они отдают свои заряды и затем, действуя на воду (H_2O), образуют H_2SO_4, причем выделяется кислород.

Если измерить объемы водорода и кислорода, то окажется, что объем, занимаемый водородом, всегда в два раза превышает объем, занимаемый кислородом. Указанное обстоятельство является одним из оснований, заставляющих предполагать, что молекула воды действительно состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода.

304. Гальванопластика. Если вместо серной кислоты взять раствор медного купороса ($CuSO_4$), то результат будет во всех отношениях тот же самый и только вследствие того, что водородные ионы в растворе замещены теперь ионами меди, веществом, выделяющимся на катоде вместо водорода, будет чистая медь. На этом основана так назыв. гальванопластика. В промышленных установках положительная пластина, т. е. пластина, через которую ток входит в ванну, всегда изготовляется из того самого металла, который должен быть выделен из раствора, потому что в этом случае ионы SO_4 или другие отрицательные ионы растворяют эту пластину так же быстро, как ионы металла выделяются на другой. Крепость раствора остается, следовательно, неизменной. Действительно, металл просто берется с одной пластины и откладывается на другой. Рис. 251 изображает простейший вид гальванопластической ванны. Анод *A* состоит из чистого серебра. Ложка, которую

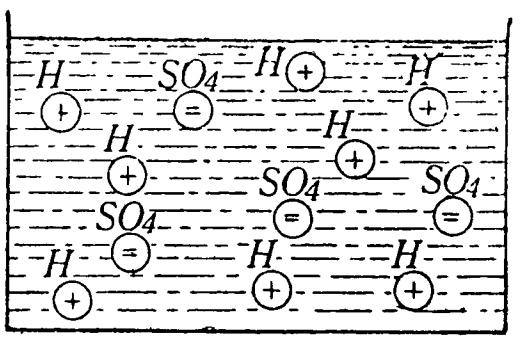


Рис. 250. Ассоциация молекул серной кислоты в воде.

нужно посеребрить, служит катодом *K*. На практике предметы, подлежащие обработке, подвешиваются обычно к центральному стержню (рис. 252), и с обеих сторон этих предметов подвешиваются аноды. При таком расположении получается более ровный слой металла. Раствор, употребляемый для серебрения, состоит из 500 *г* цианистого калия и 250 *г* цианистого серебра на 10 *л* воды.

305. Электротипия. В процессе электротипии страница текста сначала набирается обычным типографским шрифтом. Затем изготовляется слепок с нее из воска или гуттаперчи. Далее этот слепок для того, чтобы сделать его проводником, покрывается тонким слоем порошкообразного графита, после чего он может быть подвешен в качестве катода в гальванопластической ванне, анодом которой служит пластина чистой меди, а жидкостью — раствор медного купороса. После того как на слепке отложился слой меди толщиной с лист бристольского картона, воск заменяется с задней стороны слепка типографским металлом для придания прочности слою меди. С такой пластины может быть получено до ста тысяч оттисков. Почти все книги, имеющие большой тираж, печатаются с таких электротипов.

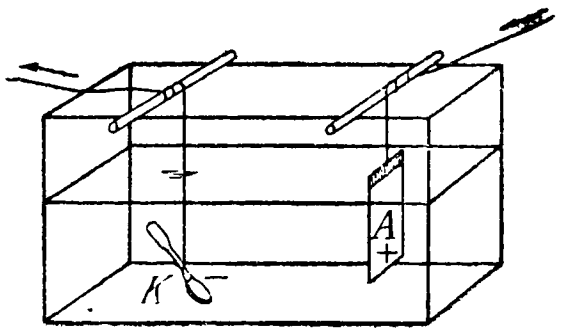


Рис. 251. Простая гальванопластическая ванна.

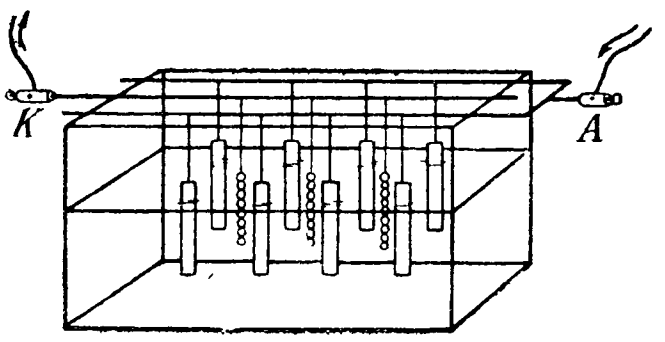


Рис. 252. Гальванопластическая ванна.

306. Единицы силы тока и количества электричества. В 1834 г. Фарадей нашел, что один и тот же электрический ток, проходящий в течение одного и того же промежутка времени, всегда отлагает одно и то же количество данного химического элемента, независимо от того, в каком растворе последний находится. Так, например, единица силы тока ампер всегда выделяет в течение часа 4,025 *г* серебра, будет ли электролитом азотистое серебро, цианистое серебро или какое-либо другое соединение серебра. Это количество называется электрохимическим эквивалентом серебра. Равным образом, один ампер отлагает в течение часа 1,181 *г* меди, 1,203 *г* цинка и т. д. Далее Фарадей нашел, что количество отложившегося металла зависит только от произведения силы тока на время, т. е. от количества электричества, прошедшего через электролит (количество электричества, перенесенное в течение часа током силою в один ампер, называется иногда ампер-часом). Описанные явления составляют основание следующих определений силы тока и количества электричества, принятых законом:

Единица силы тока, ампер, есть ток, который в одну секунду отлагает 0,001118 грамма серебра.

Единица количества электричества, назы-

ваемая кулоном, есть количество электричества, потребное для того, чтобы отложить 0,001118 грамма серебра.

Резюме. **Электролиз предоставляет собой прохождение тока путем переноса ионов.**

При гальванопластике анод растворяется с той же самой скоростью, с которой металл отлагается из раствора на катоде.

Вопросы и задачи.

1. Опишите и объясните следующие явления, происходящие при электролизе воды: 1) ионизация кислоты, прибавленной к воде; 2) роль материала анода; 3) электрическое состояние анода и катода; 4) причина странствования ионов; 5) обстоятельства, сопровождающие выделение кислорода.
2. Если зажимы батареи погружены в стакан с подкисленной водой, то можете ли вы по скорости выделения газов на электродах узнать, какой электрод положительный и какой отрицательный?
3. Каким образом можно с помощью электрического тока позолотить серебряную ложку?
4. Если электрохимический эквивалент серебра (выраженный в граммах на ампер-секунды) равен 0,001118, то сколько времени потребуется для того, чтобы отложить током силою в 3 ампера 2,4 *г* серебра?
5. Чему равнялась сила тока, который в течение 30 минут отложил 11,84 *г* меди?
6. Сколько кулонов в одном ампер-часе?
7. Сколько ампер-часов в одном кулоне?

МАГНИТНЫЕ ДЕЙСТВИЯ ТОКА; СВОЙСТВА КАТУШЕК.

307. Вид магнитного поля вокруг тока. Если проволоку, соединяющую пластины гальванического элемента, поместить в вертикальном положении и исследовать магнитное поле вокруг тока с помощью компасной иглы, то окажется, что магнитные силовые линии представляют собой концентриче-

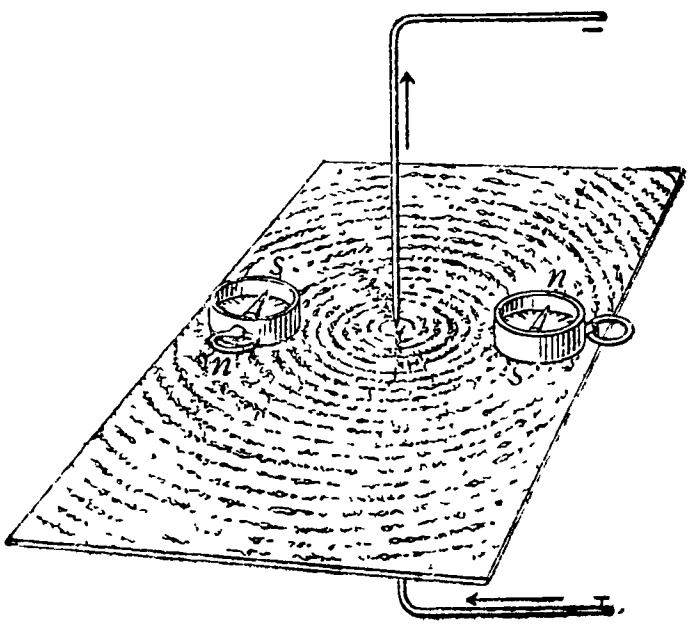


Рис. 253. Магнитное поле вокруг тока.

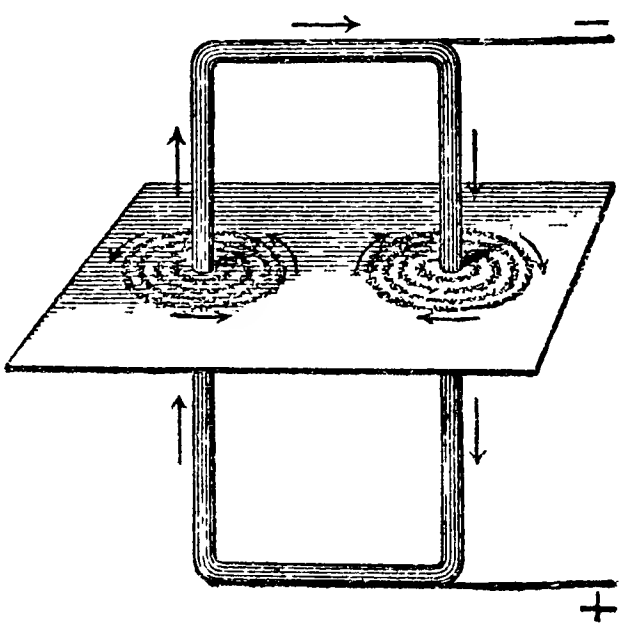


Рис. 254. Магнитное поле вокруг тока.

кие окружности, лежащие в плоскости, перпендикулярной к проволоке, причем центры всех этих окружностей лежат на оси проволоки. Далее, если изменить направление тока на обратное, то изменится на противоположное и направление, в котором отклоняется компасная игла. При достаточно сильном токе (например, в 40 ампер) вид поля можно исследовать с помощью железных опилок, помещенных на пластинку, сквозь которую проходит ток (рис. 253). В случае слабого тока опыт следует производить с большим числом витков проволоки, как показано на рис. 254.

Связь между направлением, в котором течет ток, и тем направлением, куда указывает северный полюс компасной иглы (это направление принимается за направление магнитного поля), определяется следующим правилом, называемым правилом Ампера: если охватить проволоку правой рукой, как показано на рис. 255, так, чтобы большой палец указывал направление, в котором течет ток, то тогда магнитные силовые линии будут охватывать проволоку в этом же самом направлении, как пальцы руки.

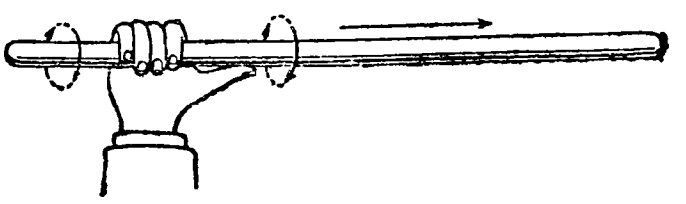


Рис. 255. Правило правої руки.

308. Проволочная петля, по которой течет ток, подобна магнитному листку. Подвесим проволочную петлю на нити, как показано на рис. 256, так, чтобы ее концы были погружены в чашечки, наполненные ртутью. Затем пропустим по петле ток от трех или четырех элементов. При этом петля сама установится таким образом, что плоскость ее, из которой по правилу правой руки выходят магнитные силовые линии (см. § 307 и рис. 257), будет теперь направлена к северу. Поднесем к петле намагниченный стержень. Петля будет себя вести по отношению к магниту точно так же, как если бы она представляла собой плоский магнитный листок, ограниченный проволокой, в котором поверхность обращенная к северу, представляет собой северный полюс, а противоположная — южный.

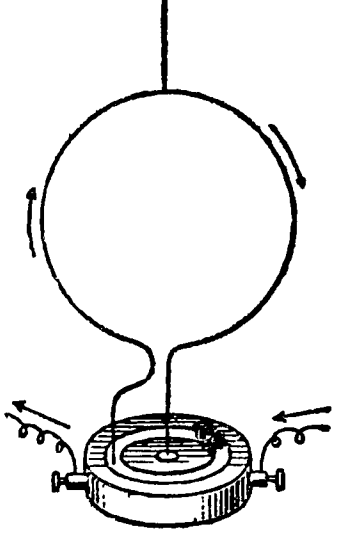


Рис. 256. Петля с электрическим током, производящая такое же действие, как плоский магнитный диск.

Опыт этот показывает, какое положение всегда будет стремиться занять в магнитном поле петля, по которой проходит ток; так как магнит всегда стремится установиться таким образом, чтобы прямая, соединяющая его полюсы, была параллельна направлению магнитных силовых линий поля, в которое он помещен, петля должна сама устанавливаться так, чтобы прямая, соединяющая ее магнитные полюсы, была параллельна силовым линиям магнитного поля, т. е. чтобы плоскость петли была перпендикулярна к полю (см. рис. 258;) или, выражая то же самое в несколько иной форме, если по проволочной петле, которая помещена в магнитное поле и может свободно поворачиваться, проходит ток, то петля сама установится в таком положении, когда она пересекает возможно большее число силовых линий поля.

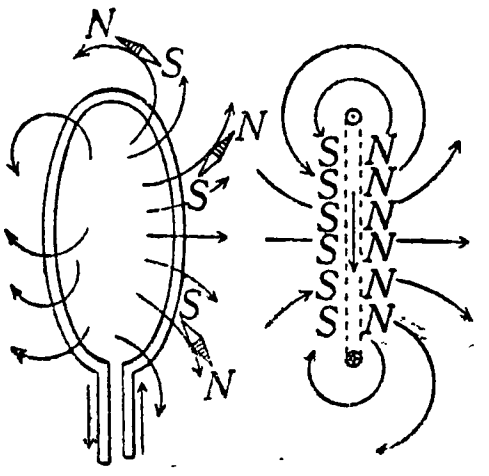


Рис. 257. Северный полюс диска представляет собою плоскость, у которой выходят магнитные силовые линии; южный полюс представляет собой плоскость, в которую силовые линии входят.

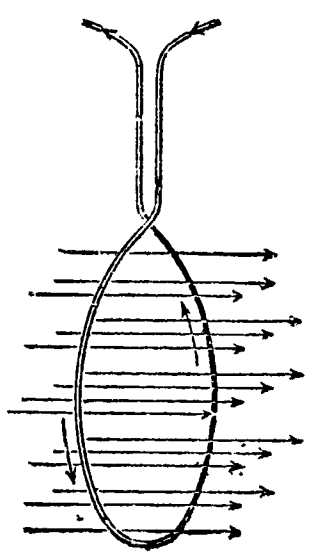


Рис. 258. Положение, в котором устанавливается петля с электрическим током, помещенная в магнитном поле.

309. Соленоид, по которому проходит ток, подобен намагниченному стержню. Намотаем проволоку, располагая ее в виде

последовательного ряда петель (с о л е н о и д); пустив затем по ней ток, поднесем к подвешенному магниту, как на рис. 259. Мы увидим, что она действует совершенно так же, как магнит с северным полюсом на одном конце и с южным полюсом — на другом.

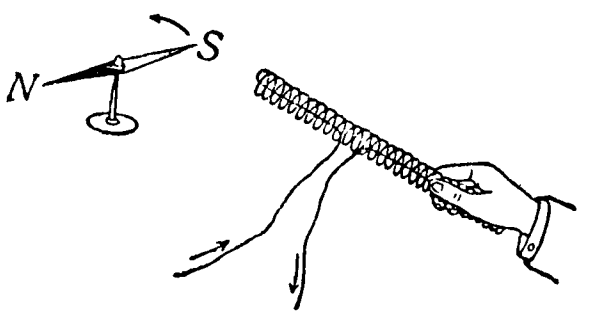


Рис. 259. Магнитное действие соленоида.

Этот результат можно было бы предугадать, основываясь на уже известном нам факте, что одна петля с током подобна магнитному листку; действительно, если сложить такие листки в стопку, как в соленоиде, то результат получится такой же, как если бы ряд намагниченных листков расположили в колонку, причем северный полюс одного был обращен к южному полюсу следующего и т. д. Таким образом все полюсы полностью нейтрализовали бы друг друга за исключением двух полюсов на обоих концах. При этом получается магнитное поле вида, представленного на рис. 260; стрелки, как обычно, указывают направление, в котором стремится двигаться северный полюс.

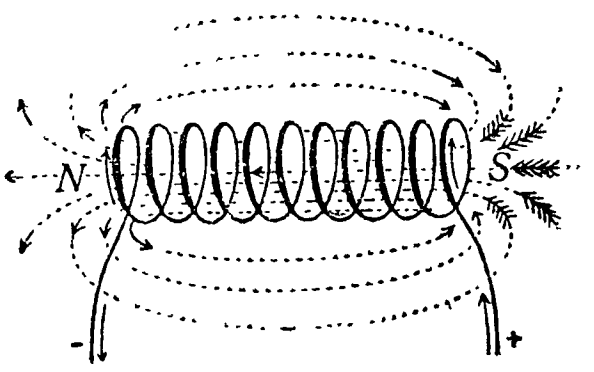


Рис. 260. Магнитное поле соленоида.

Правило правой руки, сообщенное в § 307, достаточно для того, чтобы во всех случаях находить северный и южный полюсы соленоида, т. е. указывать, из какого конца соленоида магнитные силовые линии входят и из какого выходят. Однако считают более удобным, имея дело с катушками, высказывать правило правой руки в несколько ином виде, а именно: е с л и о х в а т и т ь к а т у ш к у п р а в о й р у к о й т а к и м о б р а з о м, ч т о б ы п а л ь ц ы (к р о м е б о л ь ш о г о) у к а з ы в а л и н а п р а в л е н и е, в к о т о р о м п о п р о в о л о к а м т е ч е т т о к, т о б о л ь ш о й п а л е ц у к а ж е т н а с е в е р н ы й п о л ю с с о л е н о и д а (см. рис. 261). Точно так же, если известны знаки полюсов, а направление тока неизвестно, то оно может быть определено следующим образом: нужно снова положить правую руку на катушку так, чтобы большой палец указывал направление силовых линий (т. е. был направлен к северному полюсу соленоида); тогда остальные пальцы охватят катушку в направлении, по которому течет ток.

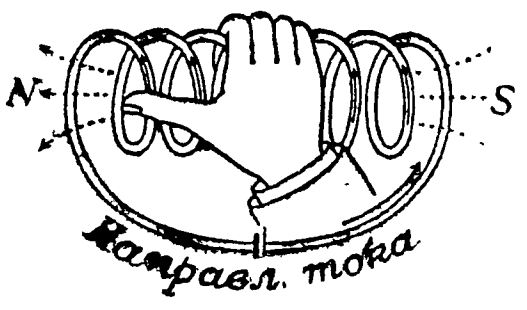


Рис. 261. Правило для нахождения полюсов соленоида.

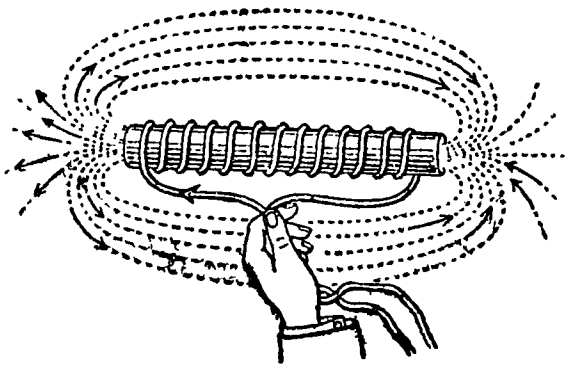


Рис. 262. Полосовой электромагнит.

310. Электромагнит. Поместим в соленоид сердечник из мягкого железа (рис. 262). При этом весьма значительно возрастет сила полюсов. Объяс-

няется это тем, что благодаря индукции поля соленоида сердечник намагничивается точно таким же образом, как он намагничивался бы посредством индукции, если бы был помещен в поле постоянного магнита. Общее напряжение поля вокруг катушки представляет собой теперь сумму напряжений полей, создаваемых сердечником и самой катушкой. Если прервать ток, то катушка сразу же утратит значительную часть своего магнетизма. Если же переменить направление тока на обратное, то при этом полюсы сердечника поменяются местами. Такая катушка с сердечником из мягкого железа называется э л е к т р о м а г н и т о м.

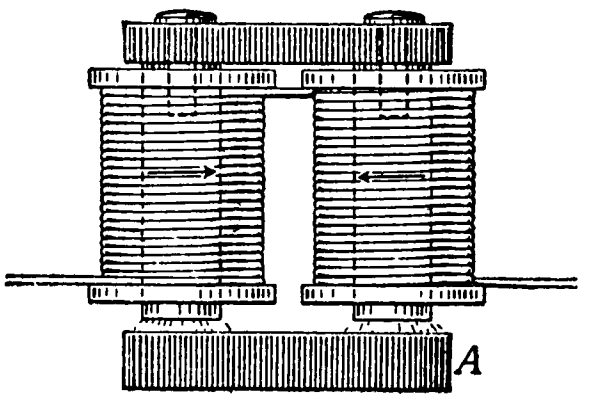


Рис. 263. Подковообразный электромагнит.

Сила электромагнита может быть значительно увеличена, если придать ему такую форму, при которой магнитные линии остаются в железе на всем своем протяжении, а не выходят в воздух, как на рис. 262. Поэтому электромагнитам обычно придают подковообразную форму и снабжают арматурой A (рис. 263), благодаря чему силовые линии весь свой путь проходят в железе, как показано на рис. 264. Сила такого магнита зависит от количества и качества, а также формы железа, но главным образом от числа окружающих его а м п е р - в и т к о в; выражение «ампер-витки» служит для обозначения произведения из числа оборотов проволоки вокруг магнита на количество ампер, проходящих в каждом обороте. Так, например, ток в $^1/_{100}$ ампера, протекающий вокруг сердечника 1 000 раз, даст электромагнит почти такой же силы, как ток в 1 ампер, обтекающий сердечник 10 раз (см. изображение современного подъемного магнита).

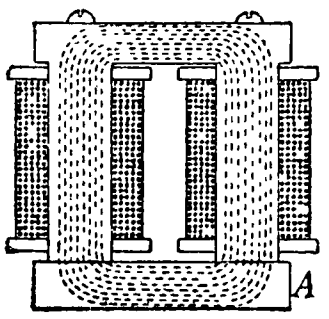


Рис. 264. Магнитная цепь электромагнита.

Резюме. **Правила правой руки: 1) Охватите проводник правой рукой так, чтобы большой палец указывал направление тока; тогда остальные пальцы будут направлены вдоль магнитных силовых линий. 2) Охватите соленоид правой рукой так, чтобы пальцы (кроме большого) указывали направление тока в катушках; тогда большой палец укажет направление магнитных линий.**

Сила электромагнита зависит главным образом от числа его ампер-витков.

Вопросы и задачи.

1. В каком направлении отклонится северный полюс компасной иглы, если держать ее над проводником, по которому ток течет с севера на юг?

2. Человек стоит под трамвайными проводами, идущими с севера на юг, и обнаруживает, что магнитная игла в его руках отклонилась северным концом к востоку. В каком направлении течет по проводам ток?

3. Почему электромагнит, приготовленный из голой проволоки, намотанной на голый сердечник, будет бесполезен в качестве магнита?

4. Если смотреть сверху на концы Γ-образного электромагнита, то будет ли итти ток вокруг обеих катушек в одном и том же направлении, или в противоположных? Будет ли он итти вокруг северного полюса по часовой стрелке, или против часовой стрелки?

5. Плоскости подвешенной проволочной петли обращены на запад и на восток. По петле идет ток, проходя по верхнему краю с востока на запад. Что случится с петлей, если она может свободно поворачиваться?

6. Два электромагнита имеют одинаковые сердечники. На один из них

намотаны 5000 оборотов проволоки, по которой пропускается 0,04 ампера; на другой намотано 100 витков более толстой проволоки. Сколько ампер нужно пустить в соленоид из 100 витков для того, чтобы произвести в сердечнике то же самое магнитное действие?

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ.

311. Гальванометр. Электрические токи, вообще говоря, измеряются по силе магнитного действия, которое они способны произвести при определенных условиях. Так, например, если придать форму круга проволоке, по которой проходит электрический ток, как изображено на рис. 265, то правило правой руки показывает, что магнитное поле в центре катушки подобно представленному на рисунке. Если расположить теперь катушку так, чтобы плоскости ее витков были обращены соответственно на север и на юг, и поместить в центре компасную иглу, то ток, проходящий по катушке, будет стремиться отклонить иглу и заставить ее указывать на восток и на запад. При этих условиях величина отклонения принимается за меру силы тока. Единица тока, а м п е р, представляет собой на самом деле ток, который, проходя по круговой катушке из трех витков диаметром в 10 *см*, обращенной своими плоскостями на север и на юг, вызовет в Вашингтоне отклонение на 45 градусов маленькой компасной иглы, помещенной в центре. Общепринятое определение ампера основывается однако на химическом действии тока. Оно было дано в § 306.

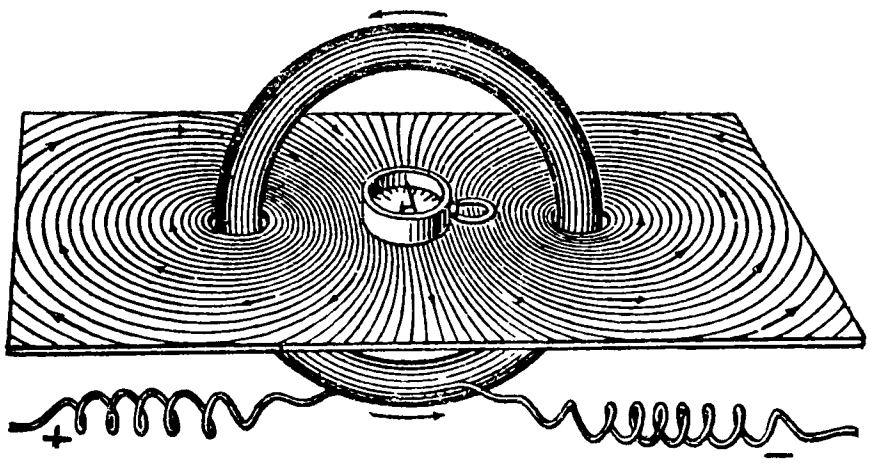


Рис. 265. Магнитное поле вокруг кольцеобразной катушки с током.

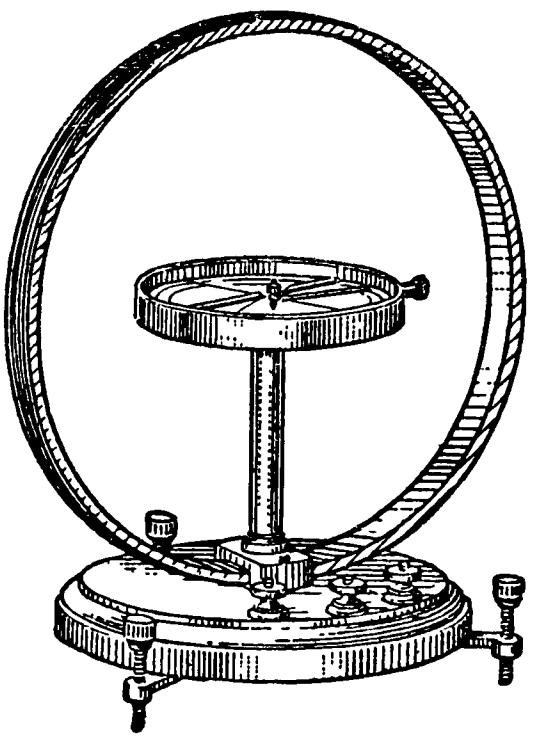


Рис. 266. Гальванометр с неподвижной катушкой.

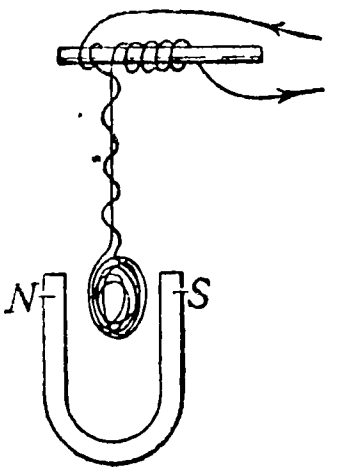
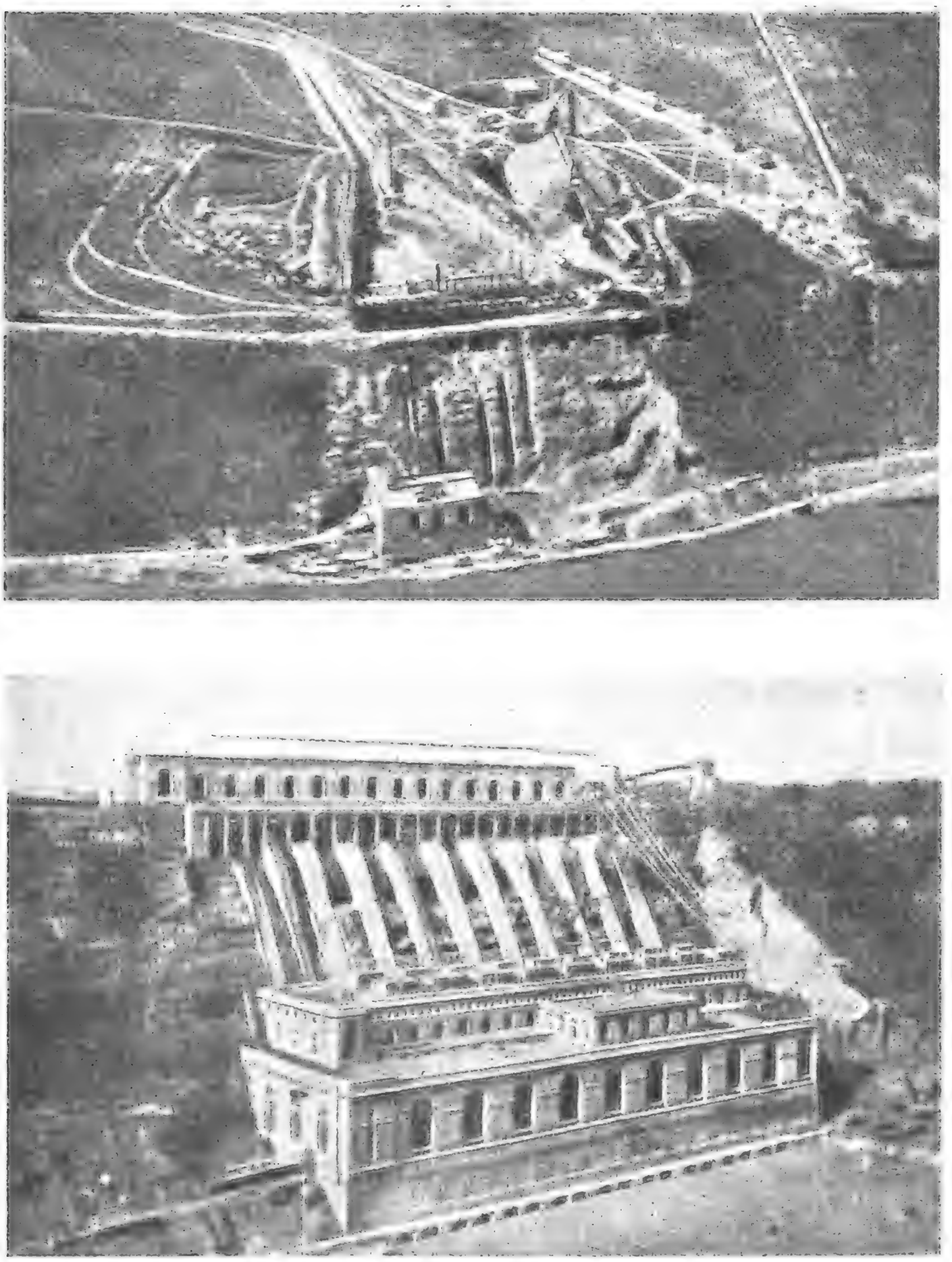


Рис. 267. Простой гальванометр с подвешенной катушкой.

Почти все приборы для измерения тока состоят в основном из небольшой компасной иглы, укрепленной в центре неподвижной катушки, как на рис. 266, или из подвижной катушки, подвешенной между полюсами неподвижного магнита, как грубо представлено на рис. 257. Ток, проходя по катушке, вызывает отклонение в первом случае магнитной иглы по отношению к неподвижной катушке и во втором случае — катушки по отношению к неподвижному магниту. Если прибор проградуирован таким образом, что дает силу тока прямо в амперах, он называется а м п е р м е т р о м; в противном случае он называется г а л ь в а н о м е т р о м (рис. 268.)

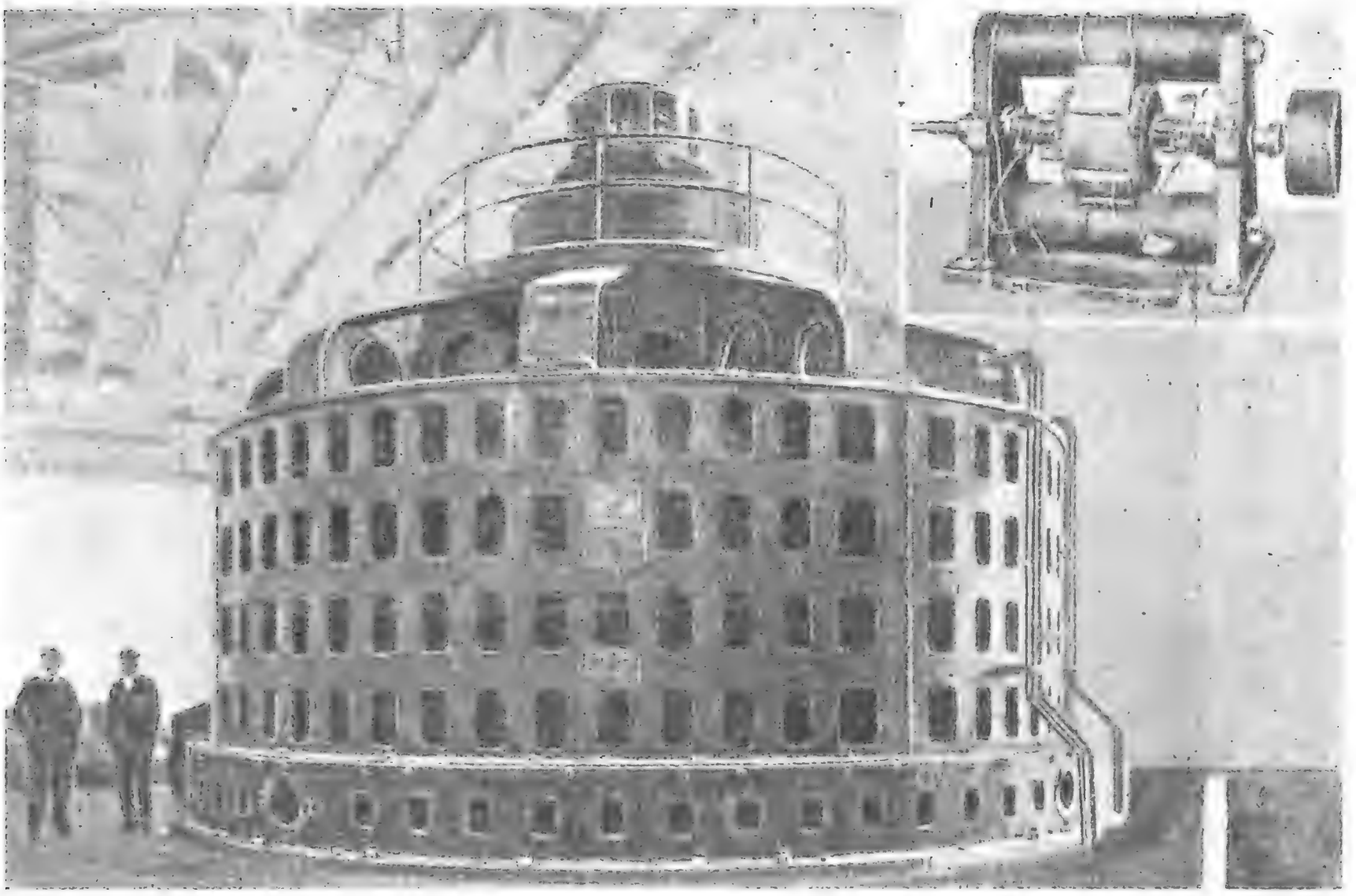
312. Технический амперметр. Рис. 269 изображает устройство применяемого в технике амперметра обычного типа. Катушка *c* вращается в алмазных подшипниках и удерживается в своем нулевом



ВЕЛИЧЕСТВЕННАЯ ГИДРОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ В КВИНСТОНЕ, В КАНАДЕ, МОЩНОСТЬЮ В ПОЛМИЛЛИОНА л. с.

На верхнем рисунке—станция в периоде постройки, с 20-ти *км* каналом и частично взорванными горными породами. На нижнем рисунке — законченная станция. Вода с высоты 100 *м* падает на турбины, почти полностью поглощающие ее энергию: это видно по спокойному течению вытекающей воды.

положении спиральной пружиной *p*. Внутри ее помещается цилиндр из мягкого железа, вокруг которого она свободно может поворачиваться. Когда через прибор проходит ток, катушка в отсутствии



ВИД ОДНОЙ ИЗ СТАРЕЙШИХ ДИНАМО И ДИНАМО СОВРЕМЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ.

В верхнем правом углу — первая динамо, построенная в САСШ (3 киловатта, 150 вольт, построенная студентами в 1875 г. Копия с динамо Граммо, построенной во Франции в 1873 г.). Нижний рисунок — один из трех громадных турбогенераторов, недавно установленных на Ниагарском водопаде, — 6 500 киловатт, 12 000 вольт. Высота первой машины — 65 *см*, высота другой — 9 *м*.

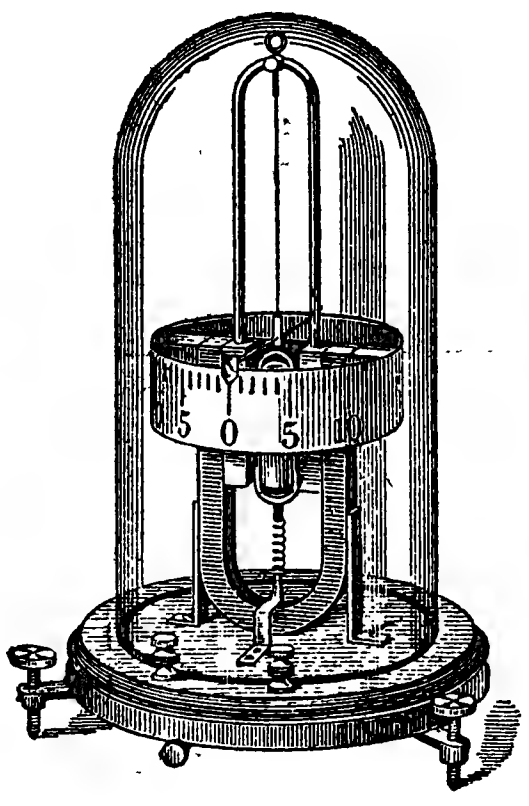


Рис. 268. Демонстрационный гальванометр.

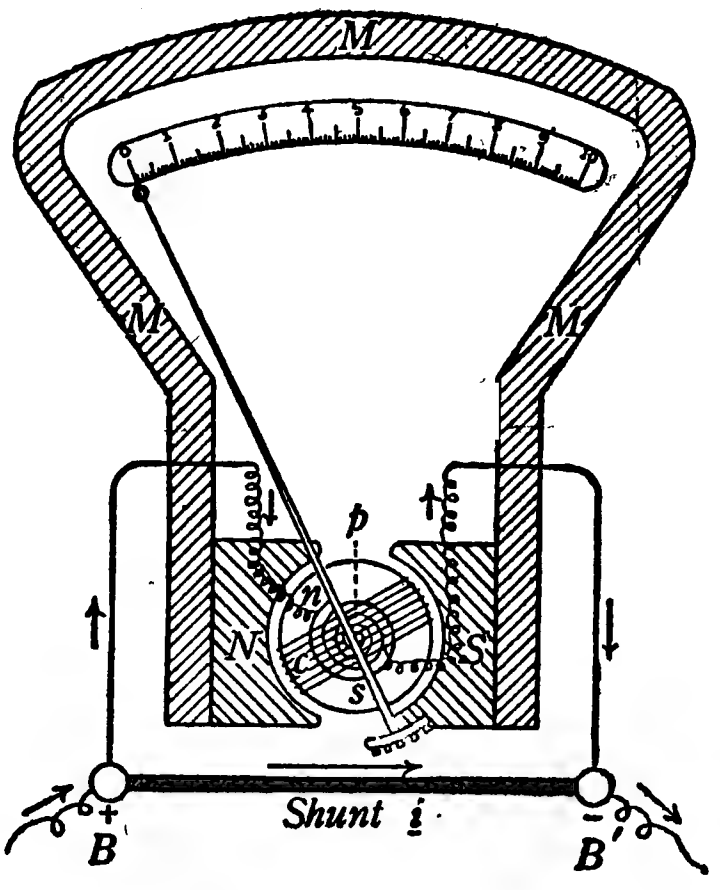


Рис. 269. Устройство технического амперметра.

пружины *p* повернулась бы на угол приблизительно в 120°, пока ее северный полюс не остановился бы против южного полюса магнита

(см. рис. 269). Изображенное на рис. 269 нулевое положение катушки выбрано потому, что оно позволяет получить почти равномерную шкалу делений. Через проводник i, называемый ш у н т о м, проходит почти весь ток, попадающий в прибор в точке B, и только в е с ь м а м а л а я его часть проходит через подвижную катушку c. Шунт обычно помещается внутри прибора, исключая те случаи, когда требуется его менять и иметь таким образом несколько шунтов.

Резюме. **Токи обычно измеряются с помощью гальванометров. Последние могут состоять: 1) из подвижной катушки с неподвижным магнитом или 2) из подвижного магнита с неподвижной катушкой.**

Вопросы и задачи.

1. На каком принципе основан химический способ измерения силы электрического тока? Магнитный способ?
2. Каким образом можно узнать, будет ли сила электрического тока одна и т а же во всех частях контура?
3. Объясните по схеме технического амперметра (рис. 269) основы устройства гальванометра с подвесной катушкой (так называемый тип д'Арсонваля).
4. Какая сила противодействует движению, создаваемому магнитным полем тока в гальванометре, состоящем из неподвижной катушки и магнитного компаса?
5. Какая сила противодействует движению катушки: 1) в гальванометре с подвесной катушкой, 2) в техническом амперметре, изображенном на рис. 279?
6. При градуировке амперметра ток, вызвавший некоторое отклонение, отложил $^1/_2$ $г$ серебра в течение 50 мин. Какова сила тока?

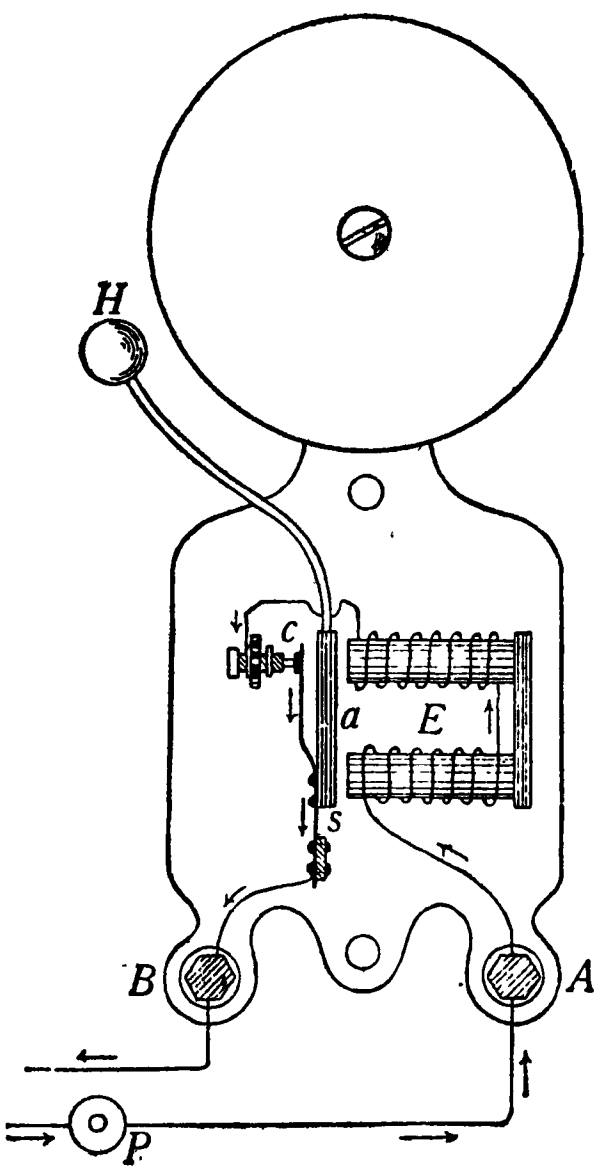


Рис. 270. Электрический звонок.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗВОНОК И ТЕЛЕГРАФ.

313. Электрический звонок. Электрический звонок (рис. 270) является одним из простейших применений электромагнита. При нажатии кнопки P (рис. 270 и 271) замыкается электрическая цепь батареи, и ток проходит через A, через катушки магнита, через замкнутый контакт c и снова выходит наружу в B. Сразу же, после того как ток этот установится, электромагнит E притягивает арматуру A, вследствие чего контакт в c прерывается. После этого ток прекращается, магнит E размагничивается. Арматура снова отталкивается и прижимается к c пружиной S. После того как восстанавливается контакт в c, ток снова начинает проходить, и все повторяется сначала. Таким образом цепь автоматически замыкается и прерывается в точке c, вследствие чего молоточек H производит быстрые колебания и ударяется о звонок.

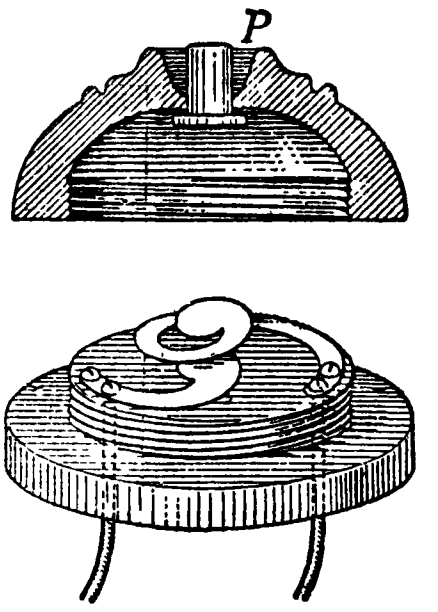


Рис. 271. Поперечное сечение кнопки электрического звонка.

314. Телеграф. Электрический телеграф представляет собой другой простой пример применения электромагнита. Основы его устройства представлены на рис. 272. Если, например, в Москве замкнуть ключ K, то ток

пойдет по линии, например, в Ленинград. Здесь он проходит через электромагнит m и затем через землю обратно в Москву. Арматура b прижимается книзу электромагнитом m до тех пор, пока ключ K замыкает цепь. Если цепь в этом месте разомкнута, то арматура приподымается вверх пружиной d. Лента c с помощью часового механизма движется под карандашом или пером, укрепленным на арматуре b. Если цепь была замкнута на очень короткое время, то на ленте получится точка; если же на более долгое время, то — черточка. Телеграфная азбука, или азбука М о р з е, состоит из определенных комбинаций точек и черточек; благодаря этому любое известие можно послать, например, из Москвы и принять его в Ленинграде. В современной практике телеграммы обычно не записываются на ленте, потому что те-

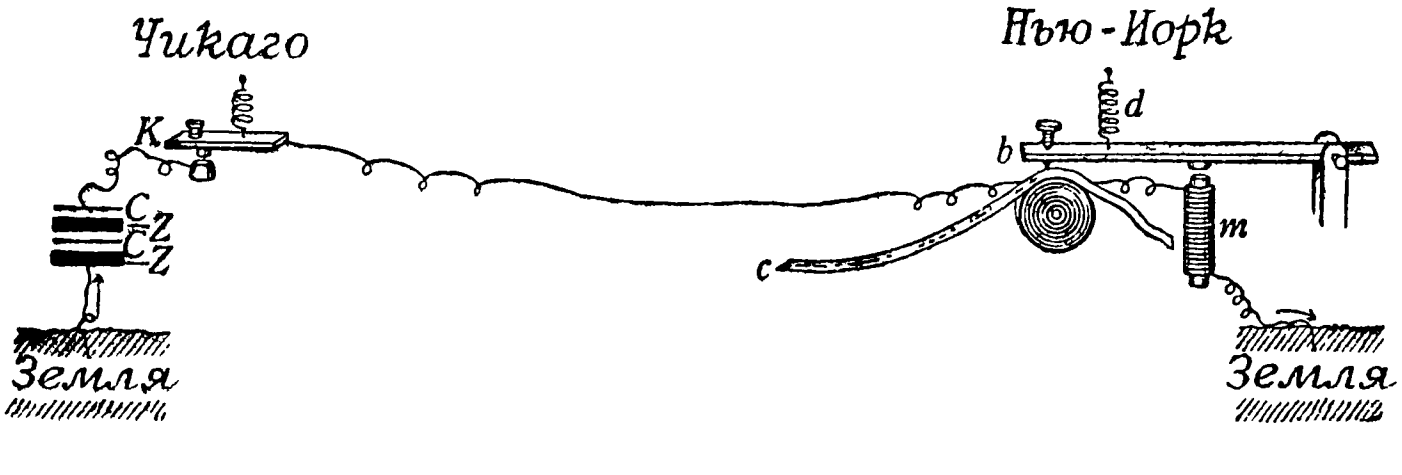


Рис. 272. Основы устройства телеграфа.

леграфисты научились принимать их на слух; очень короткий интервал между двумя ударами считается точкой, более длительный — черточкой.

Первая телеграфная линия общего пользования была построена С э м ю е л е м М о р з е между Балтимором и Вашингтоном (Северо-американские соединенные штаты). Она была открыта 24 мая 1844 г.

315. Релэ и местная цепь. Так как ток, прошедший длинную телеграфную линию, весьма слаб, то арматура электромагнита принимающего аппарата должна быть сделана очень легкой, для того чтобы приводиться в действие слабым током. Электромагнит такого аппарата изготовляется из нескольких тысяч витков тонкой проволоки, чем обеспечивается необходимое число ампер-витков (§ 310) для приведения арматуры в действие. Стук, производимый такой арматурой, однако недостаточно си-

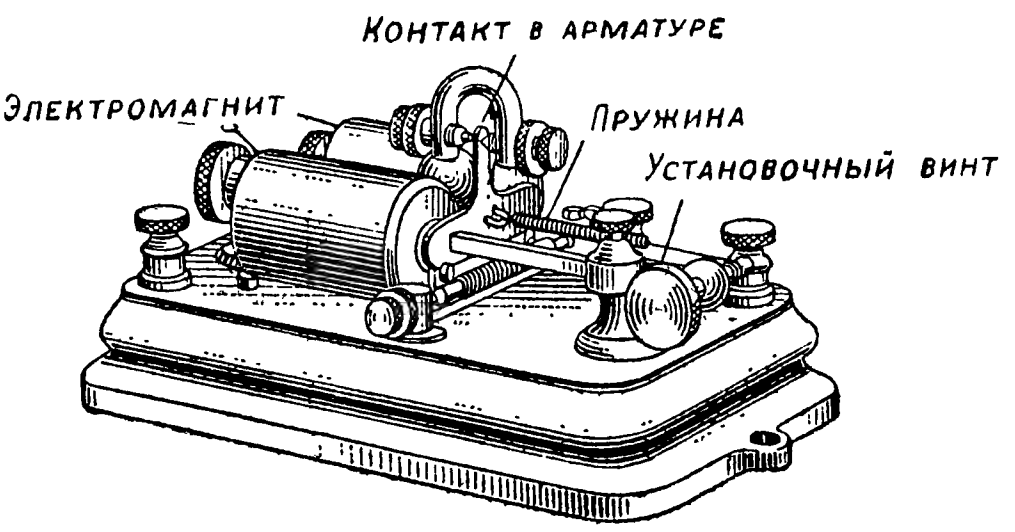


Рис. 273. Релэ.

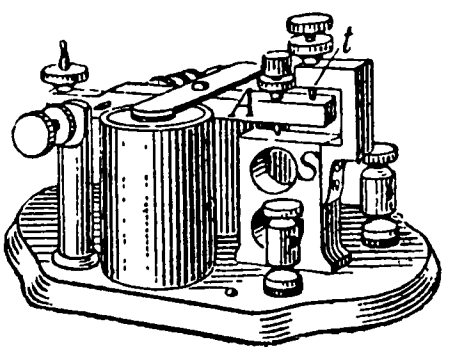


Рис. 274. Простая телеграфная система.

лен для приема на слух. Поэтому на каждой станции устраивается местная цепь, состоящая из местной батареи и второго — более тяжелого — электромагнита. Электромагнит на главной линии носит название р е л э (рис. 273 и 275). Электромагнит в местной цепи обладает весьма тяжелой арматурой (рис. 274, А), которая устроена таким образом, что она ударяется со стуком как тогда, когда она притягивается своим электромагнитом к стопору S, так и тогда, когда она поднимается пружиной и прерывает ток, ударяясь о стопор t. Интервал, протекающий между этими двумя ударами, указывает телеграфисту, была ли послана точка или черточка. Слабый ток главной линии служит просто для замыкания и размыкания цепи местной батареи, приводящей в действие к л о п ф е р (рис. 275). Электромагниты

релэ и клопфера отличаются друг от друга тем, что последний состоит из большого числа витков толстой проволоки, через который проходит сравнительно сильный ток.

316. Схема телеграфного устройства. Действительное расположение различных частей телеграфа изображено на рис. 275. Когда телеграфист в Чикаго желает послать известие в Нью-Йорк, он прежде всего размыкает рубильник, который соединен с его ключом и который остается замкнутым все время, пока передача не производится. Затем он начинает работать ключом, производя удары как на своем клопфере, так и на аппарате в Нью-Йорке. Когда чикагский рубильник замкнут, нью-йоркский — разомкнут. Нью-йоркский телеграфист может посылать известия обратно по той же самой линии. При передаче на большие расстояния, например, из Ленинграда во Владивосток, обычно пользуются промежуточными станциями; например, в Томске телеграмма автоматически передается на другую линию, по которой она идет до Иркутска, где она снова передается на третью

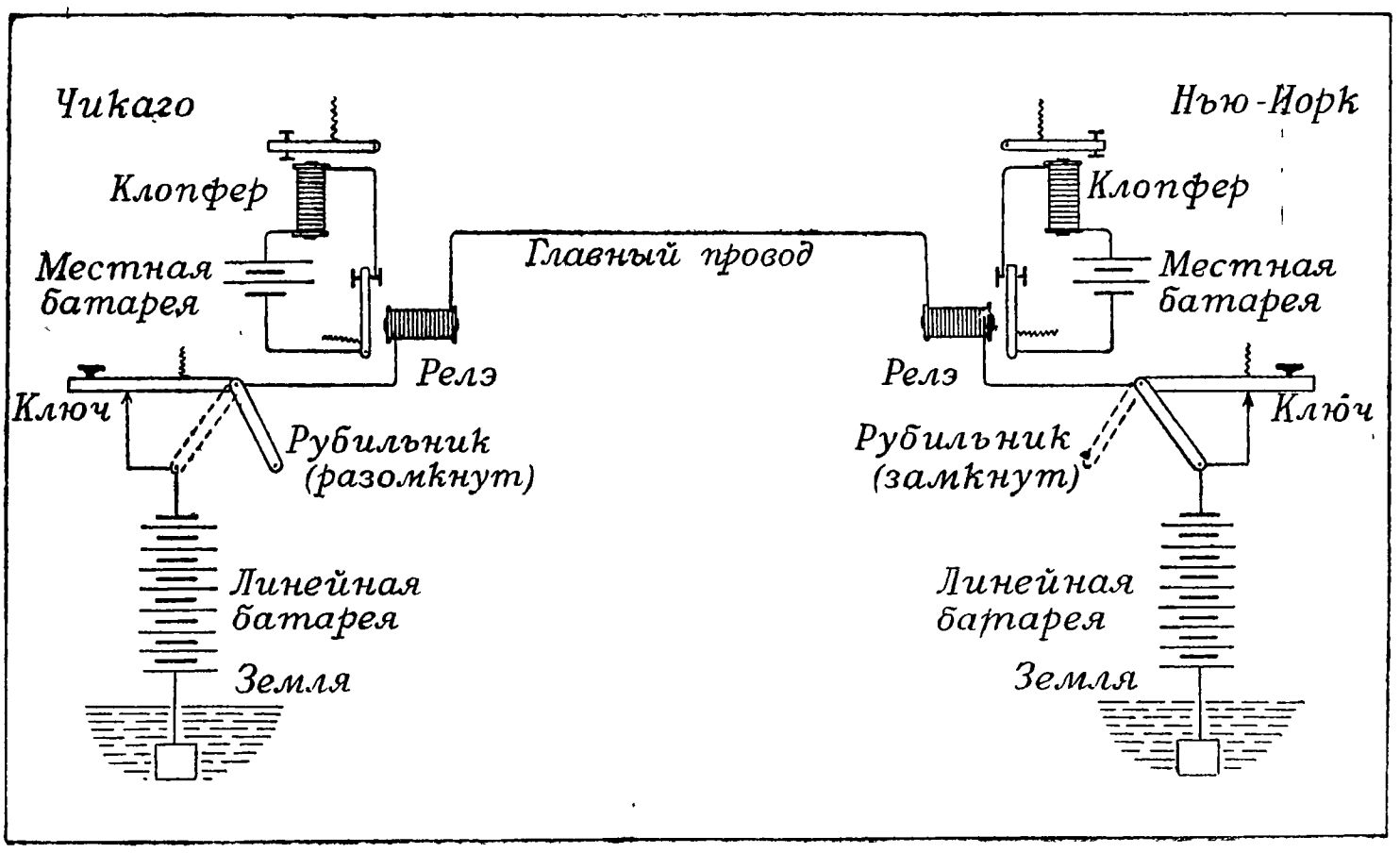


Рис. 275. Клопфер.

линию и оттуда идет уже во Владивосток. Передача на другую линию происходит точно так же, как передача из главной цепи в цепь клопфера. Если, например, продолжить цепь клопфера в Томске до Иркутска и если самый клопфер заменить релэ, а местную батарею — линейной, то тем самым будут созданы условия, обеспечивающие автоматическую передачу телеграммы в Томске.

Резюме. **Непрерывное действие электрического звонка основано на применении автоматического прерывателя.**

Телеграф системы Морзе представляет собой замкнутую цепь, по которой постоянно течет ток даже тогда, когда линия не работает.

В телеграфное релэ попадает весьма слабый ток, который проходит через соленоид, состоящий из нескольких тысяч проволочных витков.

Соленоид телеграфного клопфера состоит из небольшого числа витков, через которые должен пройти относительно сильный ток для получения необходимого при работе числа ампер-витков.

Вопросы и задачи.

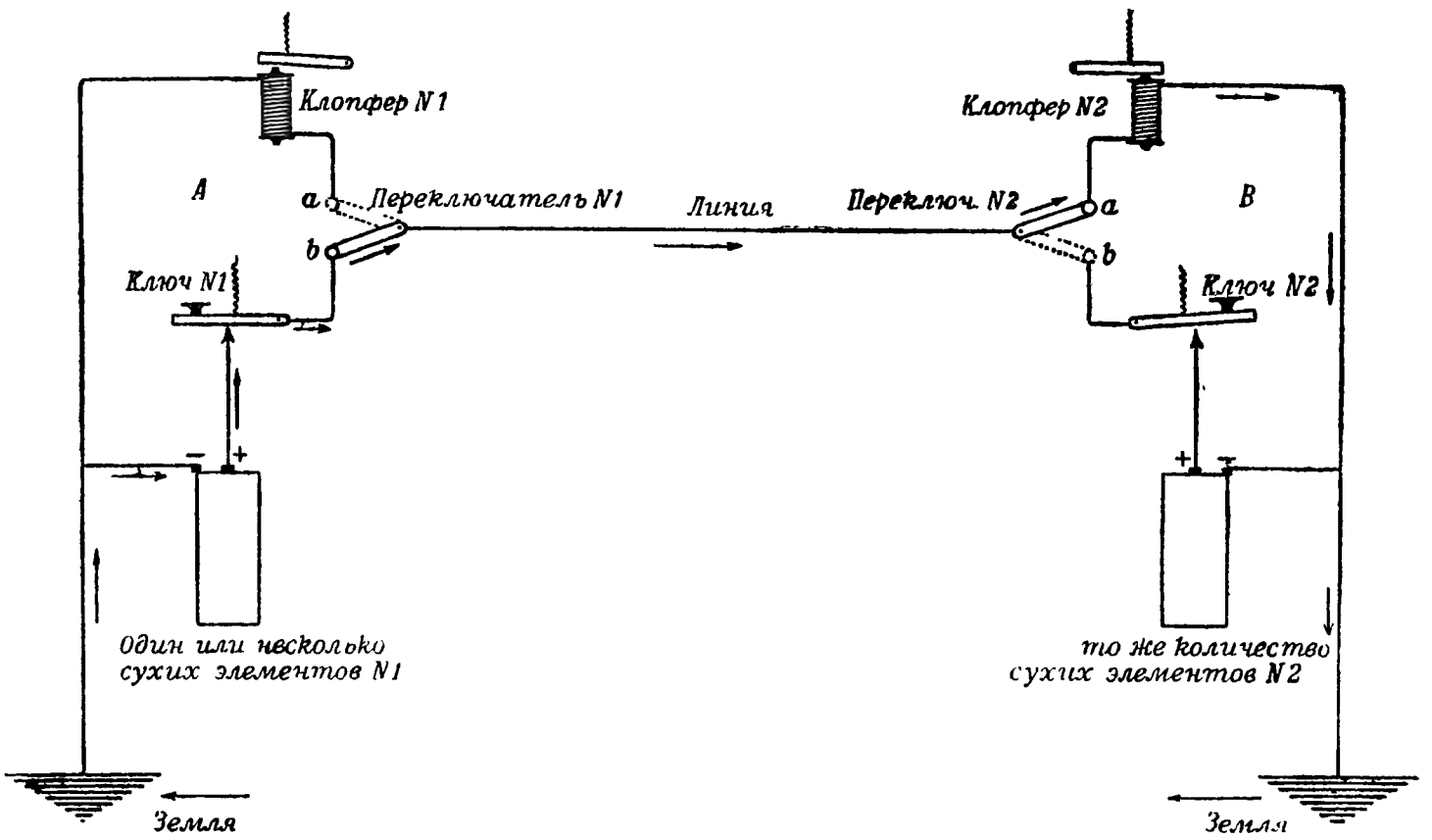
1. Начертите схему, которая показывает, как работает электрический звонок.
2. Начертите схему короткой телеграфной линии с двумя станциями, на каждой из которых имеется только по одному аппарату.

3. Начертите схему, которая показывает, как работают в телеграфной цепи релэ и клопфер. С какой целью употребляется релэ?

4. Соленоид релэ состоит из 8600 витков проволоки и работает при 0,02 ампера. Сколько это составляет ампер-витков?

5. Проходит ли ток в телеграфном устройстве, изображенном на рис. 275, когда линия не работает? Зачем это необходимо?

6. Рассмотрите схему на стр. 230 и ответьте на следующие вопросы: 1) При положениях рубильников, указанных в схеме, какая станция посылает телеграммы: *A* или *B*? 2) Как должны быть поставлены рубильники, для того чтобы станция *B* могла посылать телеграммы?



ТЕЛЕГРАФНАЯ ЛИНИЯ МЕЖДУ ДОМАМИ.

Новейшие трансатлантические кабели обернуты слоем недавно изобретенного и очень замечательного сплава «п е р м а л л о й», состоящего из 80% никкеля и 20% железа. При малом намагничивании его проницаемость превосходит проницаемость мягкого железа примерно в 30 раз. Эта большая проницаемость увеличила пропускную способность кабелей в 5—8 раз, и таким образом сильно сократилось количество необходимых кабелей.

СОПРОТИВЛЕНИЕ И ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА.

317. Электрическое сопротивление. Составим цепь из гальванического элемента, амперметра или какого-нибудь гальванометра, обладающего малым сопротивлением, и, например, 12 *м* медной п р о в о л о к и и заметим отклонение стрелки. Затем заменим медную проволоку н е й з и л ь б е р о в о й п р о в о л о к о й той же длины и толщины. Отклонение во втором случае будет во много раз меньше, чем в первом.

Следовательно, элемент, дающий некоторое определенное электрическое напряжение, может заставить протекать сквозь медную проволоку гораздо более сильный ток, чем сквозь точно такую же проволоку из нейзильбера. Поэтому мы говорим, что нейзильбер представляет большее с о п р о т и в л е н и е прохождению электричества, чем медь. Точно так же каждое вещество обладает своей характерной способностью пропускать электрический ток. Так как серебро является наилучшим известным проводником, то обычно при-

нято сопротивления различных веществ относить к сопротивлению серебра; при этом отношение сопротивления данной проволоки из какого-либо вещества к сопротивлению точно такой же серебряной проволоки называется удельным сопротивлением этого вещества. Ниже приведены удельные сопротивления некоторых наиболее употребительных металлов:

Серебро	1,00	Закаленная сталь	13,5
Медь	1,11	Нейзильбер	18,1
Алюминий	1,87	Ртуть	63,1
Мягкое железо . .	6,00	Нихром	66,6
Платина	7,20		

Сопротивление какого-либо проводника прямо пропорционально его длине и обратно пропорционально площади его поперечного сечения или квадрату его диаметра.

Единица сопротивления называется ом в честь немецкого ученого Георга Ома.

Эталон сопротивления в один ом представляет собой столб ртути в 106,3 *см* длины и 1 *кв. мм* поперечного сечения при 0° С.

На примере реостата, применяемого для регулирования освещения зрительных зал мы видим весьма важный в технике способ контроля и изменения силы электрического тока путем изменения введенного в цепь сопротивления.

318. Сопротивление и температура. Составьте цепь из гальванического элемента, гальванометра весьма малого сопротивления и из 3 *м* железной проволоки, намотанной на полоску асбеста. Наблюдайте за показаниями гальванометра, нагревая проволоку в пламени бунзеновской горелки. При этом окажется, что по мере увеличения температуры сила тока будет непрерывно падать.

Опыт показывает, что с возрастанием температуры сопротивление железа увеличивается. Это является общим законом, справедливым для всех металлов. С другой стороны, в случае жидких проводников сопротивление с повышением температуры обычно уменьшается. Уголь и несколько других твердых тел ведут себя аналогичным образом; в первых типах электрических ламп накаливания нить обладала при горении на полную мощность половиной сопротивления в холодном состоянии.

319. Электродвижущая сила и ее измерение. Разность потенциалов, которую создает между своими зажимами гальванический элемент или какой-либо другой генератор электричества, когда эти зажимы не соединены проволокой, т. е. полное электрическое напряжение, производимое генератором, обычно называется электродвижущей силой. Электродвижущую силу электрического генератора можно определить как его способность создавать электрическое напряжение. Это электрическое напряжение может быть измерено, как в § 294, по отклонению электроскопа, когда один зажим присоединен к кожуху электроскопа, а другой — к стержню. Действительно, такой способ измерения разностей потен-

циалов применяется во всех так называемых электростатических вольтметрах.

Более распространенными являются приборы типа гальванометров (рис. 268), отличающиеся от последних тем, что проволочная катушка изготовлена из весьма большого числа витков чрезвычайно тонкой проволоки, через которую поэтому проходит очень слабый ток. Однако величина протекающего через нее тока пропорциональна разности электрических напряжений между двумя ее концами, когда последние соприкасаются с теми двумя точками, разность потенциалов между которыми должна быть измерена. Принцип, положенный в основу устройства этого типа вольтметров, легче всего уясняется с помощью следующей гидравлической аналогии. Если запорный кран К (рис. 276) в трубе, соединяющей наполненные водой резервуары C и $Д$, закрыт и если водяное колесо A приведено в движение грузом W, то колесо будет вращаться до тех пор, пока не создастся разность уровней C и D, при которой напор на левую лопасть колеса не остановит его и не уравновесит груз W.

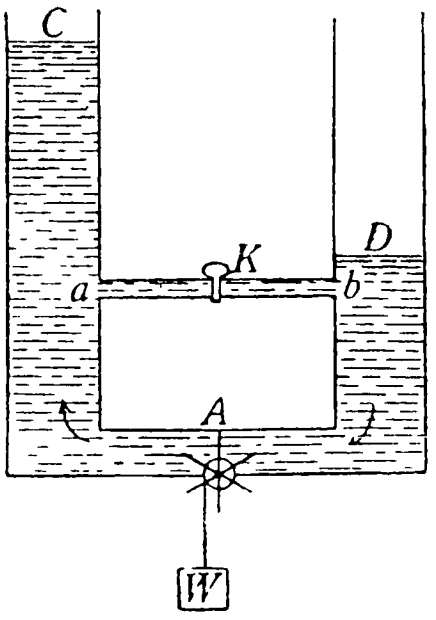


Рис. 276. Гидростатическая аналогия действия гальванического элемента.

Точно таким же образом в гальваническом элементе, зажимы которого не соединены (рис. 277), химические действия создают на этих зажимах положительные и отрицательные заряды; другими словами, между ними создается разность потенциалов до тех пор, пока обратное электрическое напряжение внутри элемента, обусловленное этой разностью потенциалов, не прекратит дальнейшего химического действия. Источник электродвижущей силы находится на поверхностях, по которым происходит соприкосновение металлов с кислотой, и где имеют место химические действия.

Далее, если установить между резервуарами с водой сообщение, открыв запорный кран К (рис. 276), то разность уровней C и D начнет падать, а колесо снова начнет ее восстанавливать. Однако, если пропускная способность трубы ab мала по сравнению со скоростью, с которой колесо может удалять воду из D и нагнетать ее в C, то разность уровней C и D, устанавливающаяся при открытом кране K, будет немногим меньше, чем когда кран K закрыт. В этом случае количество воды, протекающее по трубе ab, может быть, очевидно, принято за меру разности напоров, создаваемых насосом между C и D при закрытом кране K.

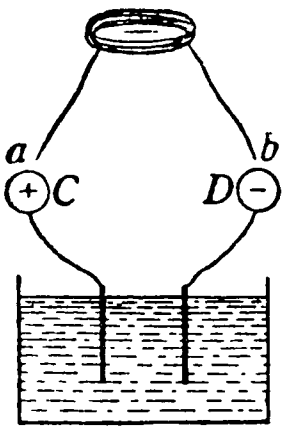


Рис. 277. Измерение разности потенциалов электродов между зажимами гальванического элемента.

Точно так же, если присоединить зажимы C и D к концам какого-либо проводника a и b, то они сразу начнут разряжаться через этот проводник и их разность потенциалов начнет поэтому падать (однако, если химические действия внутри элемента могут вновь заряжать C и D с быстротой, значительно превышающей скорость разряжения через проволоку, то тогда разность потенциалов между C и D бу-

дет лишь незначительно уменьшена присутствием соединительного проводника. В этом случае сила тока, проходящего через соединительную катушку, а следовательно и отклонение стрелки в ее центре, могут быть приняты за меру создаваемого элементом электрического напряжения, т. е. разности потенциалов, существующей между его зажимами, когда последние разомкнуты.

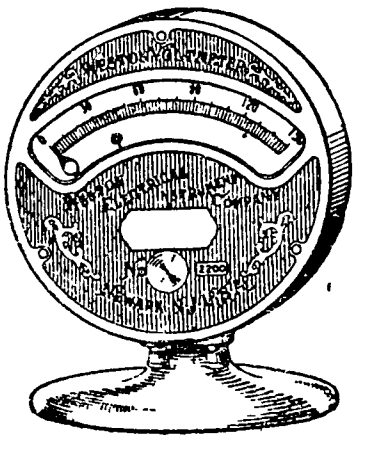


Рис. 278. Демонстрационный вольтметр.

Обыкновенный вольтметр (рис. 278) является поэтому почти точной копией амперметра с тем лишь отличием, что он обладает весьма большим сопротивлением, благодаря чему он не влияет заметным образом на разность потенциалов между теми точками, к которым его присоединяют.

320. Технический вольтметр. На рис. 279 схематически изображено устройство вольтметра, обычного вида, применяемого в технике. Его отличие от амперметра (рис. 269) сводится к отсутствию шунта, который заменен здесь катушкой высокого сопротивления R, присоединенной параллельно с подвижной катушечкой c. Сопротивление вольтметра доходит до многих тысяч омов, вследствие чего через него проходит очень слабый ток.

321. Электродвижущие силы гальванических элементов. Присоединим вольтметр к зажимам простого гальванического элемента, представленного на рис. 246. Затем будем в широких пределах менять как расстояние между пластинами, так и глубину, на которую они опущены. При этом окажется, что получающиеся отклонения не зависят ни от формы или размеров пластин, ни от их взаимного расстояния. Однако, если взять пластинки из другого материала, то показания гальванометра изменятся. Так, например, медь и цинк, погруженные в разбавленную серную кислоту, обладают электродвижущей силой в один вольт, уголь и цинк дают электродвижущую силу около 1,5 вольта, а уголь и медь — значительно меньше одного вольта. Равным образом, изменяя природу жидкости, в которую погружены пластины, мы также получим изменения в показаниях вольтметра.

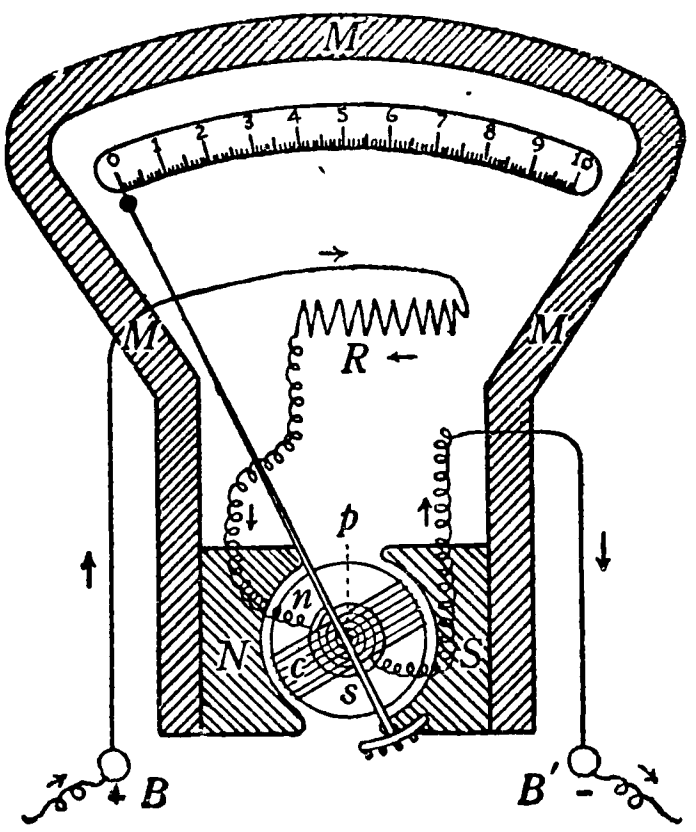


Рис. 279. Устройство технического вольтметра.

Отсюда мы заключаем, что электродвижущая сила гальванического элемента зависит исключительно от природы материалов, из которых элемент состоит, и совершенно не зависит от формы, размеров или взаимного расстояния пластин.

322. Падение потенциала вдоль проводника, по которому проходит ток. Разность потенциалов существует не только между зажимами элемента в разомкнутой цепи, но и между любыми двумя точками проводника, по которому идет ток. Например, в электрической цепи, изображенной на рис. 280, потенциал в точке a выше, чем в

точке m, в точке m выше, чем в точке n, и т. д., совершенно так же, как в гидравлической установке, представленной на рис. 281, гидростатическое давление в точке a больше, чем в точке m, в точке m больше, чем в точке n, и т. д. Падение напора воды между m и n рис. 280 измеряется разностью уровней m' и n'. Желая измерить падение электрического потенциала между m и n (рис. 280), мы касаемся зажимами вольтметра указанных точек, как указано на рис. 280. Показания вольтметра дают нам непосредственно разность потенциалов между m и n в вольтах при условии, что благодаря своему весьма высокому сопротивлению, сам прибор не оказывает заметного влияния на разность потенциалов между точками m и n, т. е., другими словами, ток, который проходит через прибор, должен быть настолько слаб, чтобы им можно было пренебречь по

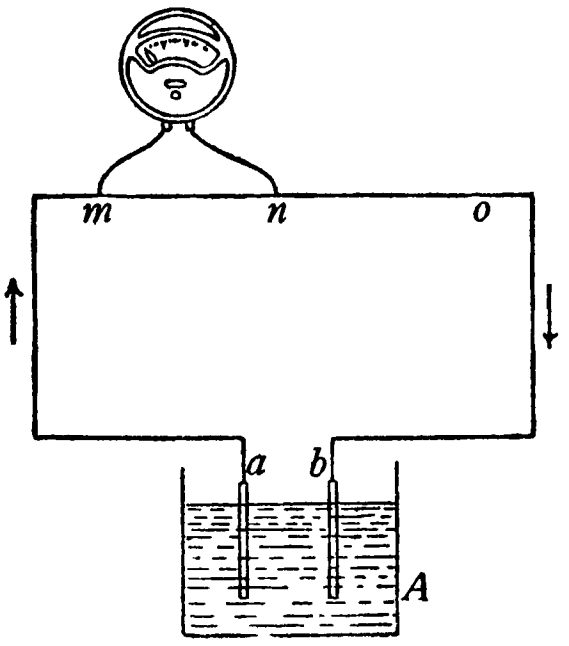


Рис. 280. Способ присоединения вольметра для определения разности потенциалов между какими-либо двумя точками и электрической цепи.

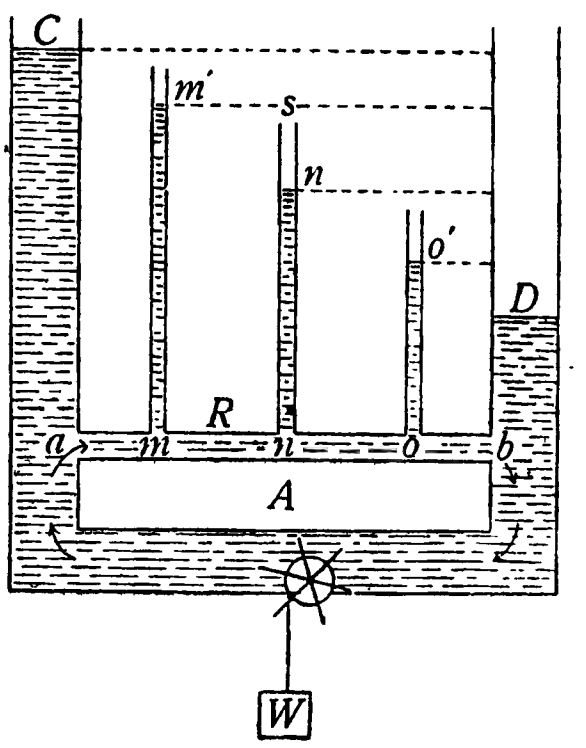


Рис. 281. Гидростатическая аналогия падения потенциала в электрической цепи.

сравнению с током, проходящим через проводник, соединяющий точки m и n.

Резюме. **Сопротивление проводника изменяется прямо пропорционально его длине и обратно пропорционально площади его поперечного сечения или обратно пропорционально квадрату его диаметра.**

$$\frac{r'}{r''} = \frac{l'}{l''}; \frac{r'}{r''} = \frac{s''}{s'} = \frac{d''^2}{d'^2}.$$

Электродвижущая сила любого генератора представляет собой полное электрическое напряжение, которое он может создать в разомкнутой цепи.

Вольтметр с магнитом представляет собою гальванометр, проградуированный для непосредственного отсчета показаний в вольтах.

Для измерения электродвижущей силы генератора вольтметр соединяется с ним последовательно; для измерения падения потенциала (разности потенциалов) в какой-либо части цепи вольтметр присоединяется в качестве шунта.

Вопросы и задачи.

1. Если сопротивление 100 *м* медной проволоки некоторого диаметра равно 2 омам, то каково сопротивление 250 *м* той же самой проволоки?

2. Сопротивление куска нейзильберовой проволоки равно одному ому. Чему равно сопротивление другого куска той же самой длины, но вдвое большего диаметра?

3. Сопротивление 1 *м* проволоки равно 6 омам. Каково сопротивление 4 *м* проволоки из того же самого материала, но втрое большего диаметра?

ЗАКОН ОМА.

323. Закон Ома. В 1826 г. Ом открыл, что силы токов, создаваемых различными гальваническими элементами или комбинациями элементов, всегда прямо пропорциональны электродвижущим силам цепей, по которым проходит ток, и обратно пропорциональны полным сопротивлениям этих цепей; т. е., если I обозначает силу тока в амперах, E — электродвижущую силу в вольтах и R — сопротивление цепи в омах, то тогда закон Ома в применении ко всей цепи выразится формулой

$$I = \frac{E}{R}, \text{ т. е. сила тока} = \frac{\text{электродвижущая сила}}{\text{сопротивление}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

В применении к какой-либо части цепи закон Ома гласит:

$$I = \frac{\text{разность потенциалов}}{\text{сопротивление}}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

где разность потенциалов в вольтах берется между какими-либо двумя точками цепи, а R обозначает сопротивление в омах проводника, соединяющего эти две точки. Закон Ома является одним из самых важных физических законов.

Обе приведенные выше формулировки закона Ома могут быть выражены одним уравнением:

$$\text{амперы} = \frac{\text{вольты}}{\text{омы}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

324. Внутреннее сопротивление гальванического элемента. Присоединим к амперметру цинковую и медную пластины простого гальванического элемента и затем будем увеличивать расстояние между ними. Окажется, что отклонение стрелки будет уменьшаться; равным образом, при уменьшении глубины погружения пластин, сила тока также уменьшится.

Отсюда следует, что так как электродвижущая сила элемента (см. § 321) совершенно не зависит от площади погруженных пластин или от расстояния между ними, то, по закону Ома, изменение силы тока в этих случаях должно быть обусловлено какими-то изменениями в полном сопротивлении цепи. Так как проволока, составляющая внешнюю часть контура, не подверглась при этом никаким изменениям, то мы должны отсюда заключить, что жидкость внутри элемента, так же как и внешняя проволока, представляет сопротивление прохождению тока. Это внутреннее сопротивление жидкости прямо пропорционально расстоянию между пластинами и обратно пропорционально площади погруженной части пластин. Следовательно, если обозначить внешнее сопротивление цепи гальванического эле-

мента через R_e, а внутреннее — через R_i, то закон Ома в применении ко всей цепи примет следующий вид:

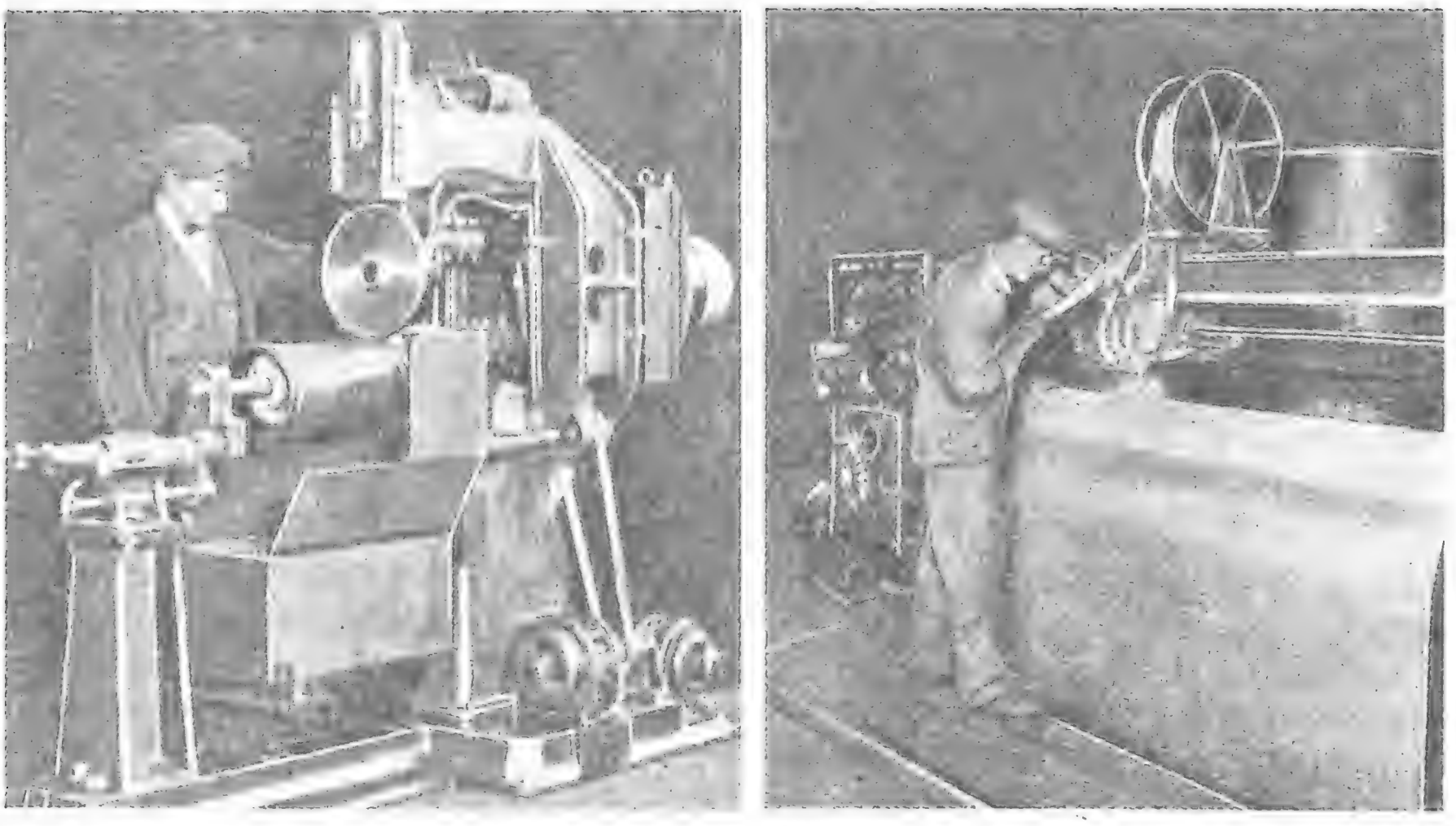
$$I = \frac{E}{R_e + R_i} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (4)$$

Таким образом, если внутреннее сопротивление цепи равно 2 омам, а ее электродвижущая сила — одному вольту, то сила тока, который пойдет в цепи, когда зажимы элемента будут соединены 2,8 *м* медной проволоки общим сопротивлением в один ом, будет равна $\frac{1}{1+2} = 0{,}33$ ампера.

325. Измерение внутреннего сопротивления. В том случае, когда имеются амперметр и вольтметр, следует электродвижущую силу элемента, показываемую вольтметром, разделить на силу тока, который проходит через амперметр, присоединенный непосредственно к зажимам элемента; в этом случае величина R_e в уравнении (4) настолько мала, что ею можно пренебречь; следовательно $R_i = \frac{E}{I}$. Отсюда непосредственно получается внутреннее сопротивление в омах.

Рис. 282. Измерение сопротивления способом амперметра — вольтметра.

326. Измерение сопротивлений способом амперметра — вольтметра. Простейший способ измерения сопротивления проволоки или вообще любого проводника состоит в том, что его включают в цепь гальванического элемента, как показано на рис. 282. Амперметр A служит для измерения силы тока, а вольтметр V — для измерения разности потенциалов между концами a и b



ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СВАРКА.

Электрическая сварочная машина. Ток в сотни ампер проходит через точку касания колеса и шва, который надо сварить, развивая нужное тепло. Направо показана автоматическая дуговая сварочная машина в момент сварки шва большого чана. В минуту сваривается металлический шов длиною в 250 *см* и толщиной 0,6 *см*.

проволоки, сопротивление R которой требуется измерить. Сопротивление проволоки R, выраженное в омах, получается с помощью формулы $I = \frac{\text{разность потенциалов}}{R}$, откуда следует, что $R = \frac{\text{разность потенциалов}}{I}$. Таким образом, если вольтметр показывает разность потенциалов в 0,4 вольта, а амперметр ток в 0,5 ампера, то сопротивление проволоки R равно $^4/_5 = 0{,}8$ ома.

327. Общее сопротивление проводников, соединенных последовательно и параллельно. Когда сопротивления соединены, как показано на рис. 283, так что тот же самый ток последовательно проходит через каждое сопротивление, то говорят, что сопро-

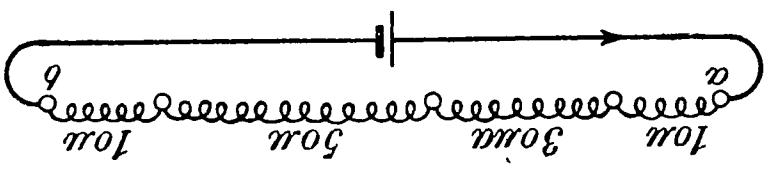


Рис. 283. Последовательные соединения.

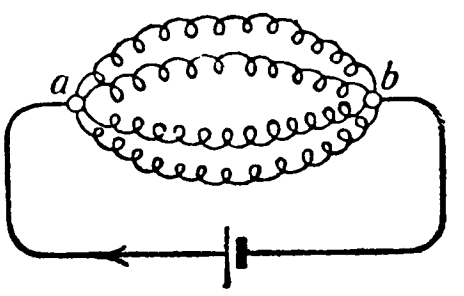


Рис. 284. Параллельные соединения.

тивления соединены **последовательно**. Полное сопротивление всех проводников, соединенных указанным образом, равно сумме отдельных сопротивлений. Так, например, в случае, представленном на рисунке, общее сопротивление между a и b равно 10 омам.

Когда же n совершенно одинаковых проводников соединены, как показано на рис. 284, т. е. **параллельно**, действительное сопротивление между a и b равно $\frac{1}{n}$ сопротивления каждого из них; действительно, при заданной разности потенциалов между точками a и b через четыре проводника пойдет в четыре раза больший ток, чем через один, а через n проводников — в n раз больший ток, чем через один. Следовательно, сопротивление, которое обратно пропорционально **электропроводности**, т. е. величине, характеризующей способность проводника пропускать ток (см. § 323), будет составлять $\frac{1}{n}$ сопротивления одного проводника.

328. Шунты. Проволока, соединенная параллельно с другой проволокой, называется шунтом последней. Так, например, говорят, что проводник X (рис. 285) шунтирован сопротивлением R. При этих условиях силы токов, проходящих через R и X, будут обратно пропорциональны их сопротивлениям, так что если сопротивление X равно 1 ому, а сопротивление R — 10 омам, то через R пойдет ток, сила которого составляет $\frac{1}{10}$ силы тока, идущего через X, или $\frac{1}{11}$ всего тока. Другими словами, так как электропроводность X в десять раз больше электропроводности R, сила тока, который пойдет через X, будет в десять раз больше силы тока, который пойдет через R, или через шунт пойдет $\frac{10}{11}$ всего тока. Амперметр (рис. 269) шунтируется проводником весьма малого сопротивления.

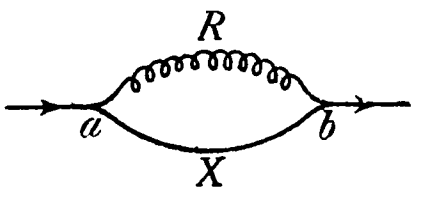


Рис. 285. Шунт.

Резюме. **Закон Ома. Амперы $= \frac{\text{вольты}}{\text{омы}}$.**

Сопротивление любого числа проводников, соединенных последовательно, равно сумме их отдельных сопротивлений.

Сопротивление группы одинаковых проводников, соединенных параллельно, равно сопротивлению одного из них, деленному на их число.

В разветвленном контуре, состоящем из двух ветвей, силы токов в отдельных ветвях обратно пропорциональны сопротивлению ветвей.

Вопросы и задачи.

1. Каким образом можно проверить, что внутреннее сопротивление элемента уменьшается при увеличении размеров пластин или при их сближении?

2. Амперметр, сопротивление которого составляет 0,05 ома, показывает силу тока в 20 ампер от аккумулятора, обладающего электродвижущей силой, равной 2 вольтам. Найдите, чему равно внутреннее сопротивление аккумулятора.

3. Какой силы ток пойдет по проволоке, сопротивлением в 12 омов, соединяющей две точки, разность потенциалов между которыми составляет 2 вольта?

4. Если вольтметр, присоединенный к зажимам лампы накаливания, показывает разность потенциалов в 110 вольт, а амперметр, соединенный с лампой последовательно, дает силу току в 0,5 ампера, то чему равно сопротивление накаленной нити? Начертите схему соединений.

5. Электрическая грелка состоит из 12 проволок одинакового сопротивления, соединенных параллельно. Сопротивление каждой проволоки в нагретом состоянии равно 50 омам. Если грелка присоединена к сети, напряжение в которой равно 110 вольтам, то какова будет полная сила тока, питающего грелку?

6. Три проволоки, каждая сопротивлением в 15 омов, были соединены параллельно, и через них был пропущен ток силою в 3 ампера. Чему равнялась разность потенциалов на концах проволок?

7. Вольтметр сопротивлением в 2000 омов шунтирован проволокой сопротивлением в 1 ом, присоединенной к зажимам A и B. Какая часть общего тока, проходящего от A к B, пройдет через вольтметр?

8. Укажите на основании формулы $I = RE$, какими двумя способами можно увеличить или уменьшить силу тока.

ПЕРВИЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ.

329. Изучение действия первичного элемента. Если производить тщательные наблюдения над описанным раньше обыкновенным элементом, т. е. цинковой и медной полосками, погруженными в разбавленную серную кислоту, то окажется, что, пока пластинки не соединены проводником, на цинковой пластинке (но не на медной) медленно образуются мельчайшие газовые пузырьки. Сразу же после соединения обеих пластинок проводником пузырьки появляются в большом количестве на медной пластинке (рис. 286), и одновременно по соединяющей проволоке начинает проходить ток. Пузырьки эти состоят из водорода. Появления их на цинковой пластинке можно избежать, применяя пластинку из химически чистого цинка или амальгамируя загрязненный цинк, т. е. покрывая его тонким слоем ртути. От пузырьков на меди избавиться невозможно. Они неизменно сопровождают прохождение тока в цепи. Если пропускать ток довольно долго, то окажется, что цинк постепенно расходуется даже в том случае, если он был амальгамирован; с медной же пластинкой не происходит никаких изменений.

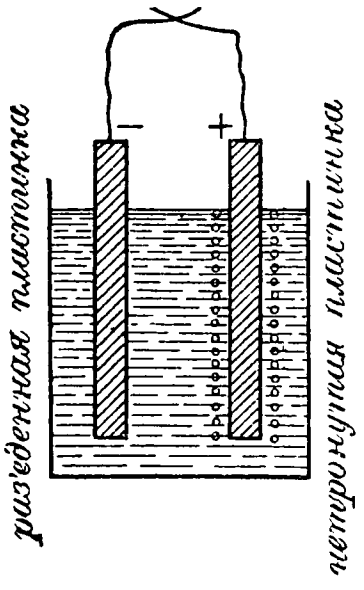


Рис. 286. Химические действия в гальваническом элементе.

Отсюда мы заключаем, что прохождение электрического тока в простом элементе сопровождается разъеданием цинковой пластинки и появлением водородных пузырьков на медной пластинке. Однородные явления происходят во всех гальванических элементах, т. е. одна из пластинок постепенно разъедается, а на другой выделяется какое-нибудь вещество. Раньше мы установили, что цинк, подвергающийся разъеданию, заряжен отрицательно (§ 301); таким образом, если соединить зажимы проволокой, то отрицательные электроны пойдут по этой проволоке от цинковой пластинки к медной. Последнее означает, что в соответствии с соглашением, упомянутым в подстрочном примечании к § 293, мы считаем ток во внешней цепи всегда направленным от неразъеденной пластины к разъеденной.

330. Местное действие и амальгамирование. Причина появления водородных пузырьков на поверхности загрязненного цинка, погруженного в разбавленную серную кислоту, заключается в том, что между цинком и небольшими примесями в нем (частицами углерода или железа) образуются маленькие электрические цепи, как изображено на рис. 287. В случае чистого цинка эти небольшие местные токи не могут возникнуть, вследствие чего и не происходит появления водородных пузырьков. Амальгамирование уничтожает эти так называемые местные действия, потому что ртуть растворяет только цинк, не затрагивая углерода, железа или других примесей. Амальгама ртути с цинком представляет собой однородное вещество, покрывающее собой всю поверхность и примеси в том числе. Цинк в батареях необходимо поэтому амальгамировать, для того чтобы цинк не расходовался, когда элемент разомкнут. При прохождении тока всегда происходит разъедание цинка; амальгамирование служит только для его предохранения в течение того времени, когда элемент не работает.

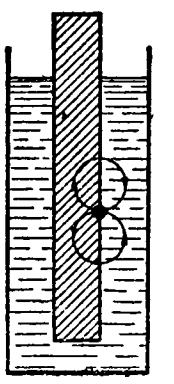


Рис. 287. Местное действие.

331. Теория действия простого элемента. Простой элемент может быть сделан из любых двух различных металлов, погруженных в раствор почти любой кислоты или соли. Для простоты рассмотрим действие элемента, состоящего из пластин цинка и меди, погруженных в разбавленный раствор соляной кислоты. Химическая формула соляной кислоты имеет следующий вид: HCl. Это означает, что каждая молекула кислоты состоит из одного атома водорода в соединении с одним атомом хлора. Как указывалось в параграфе об электролизе (§ 303), кислота при растворении в воде распадается на положительно и отрицательно заряженные ионы (рис. 288).

Когда в такой раствор помещается цинковая пластинка, кислота начинает на нее действовать и вытесняет атомы цинка в раствор. Во всех тех случаях, когда металл растворяется в кислоте, его атомы в силу пока неизвестных нам причин переходят в раствор, приобретая небольшие положительные заряды. На цинковой пластинке должны поэтому остаться соответствующие отрицательные заряды точно таким же образом, как и в том случае, когда при положительной электризации стекла, производимой трением его о шелк, отрицательный заряд остается на шелке. Именно так мы объясняем появление отрицательного заряда на цинковой пластинке в описанном раньше опыте с гальваническим элементом и электроскопом (см. § 301).

При переходе положительно заряженных ионов цинка в раствор послед-

ний становится заряженным положительно около цинковой пластинки, вследствие чего водородные ионы начинают отталкиваться от этой пластинки. Когда водородные ионы достигают медной пластинки, то часть из них отдает ей свой заряд и собирается в пузырьки водородного газа. Таким образом объясняется то обстоятельство, что в опыте § 301 на медной пластинке был найден положительный заряд.

Если цинковая и медная пластины не соединены внешним проводником, то переход положительно заряженных ионов цинка в раствор весьма скоро прекращается, потому что цинк становится настолько сильно заряженным отрицательно, что он притягивает обратно положительные ионы цинка с такой же силой, как кислота вытесняет их в раствор. Точно так же и медная пластинка скоро перестает разряжать положительные ионы водорода, потому что она успевает приобрести достаточно большой положительный заряд, отталкивающий водородные ионы с такой же силой, с какой они выталкиваются из раствора положительно заряженными ионами цинка. Указанные факты объясняют, почему в простом гальваническом элементе не происходит никаких явлений при разомкнутой цепи; цинковая и медная пластинка просто заряжаются до определенной разности потенциалов, которая называется электродвижущей силой элемента.

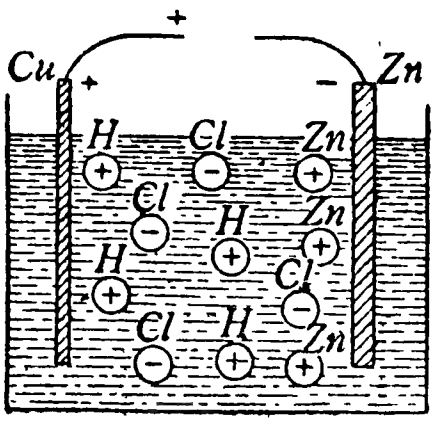


Рис. 288. Диссоциация молекул хлористоводородной (соляной) кислоты в воде.

В том же случае, когда медную и цинковую пластинки соединяют проволокой, ток сразу начинает проходить от меди к цинку, вследствие чего пластинки начинают терять свой заряд. Благодаря этому кислота снова начинает вытеснять цинк в раствор, а водород начинает выделяться у медной пластинки из раствора. Эти явления происходят непрерывно до тех пор, пока пластинки соединены. Ток непрерывно течет по проволоке до тех пор, пока не будет разъеден весь цинк или пока все водородные ионы не будут вытеснены из раствора, т. е. до тех пор, пока пластинка или кислота не будут приведены в негодность.

332. Поляризация. Если присоединить к демонстрационному амперметру простой гальванический элемент с помощью нейзильберовой проволоки № 30 длиною от 0,5 до 1 *м*, то окажется, что отклонение стрелки начнет медленно уменьшаться; однако, если удалить водород с медной пластинки (вынув ее и тщательно просушив), то показание стрелки вернется к своему первоначальному значению.

Опыт ясно показывает, что наблюдаемое падение силы тока было вызвано скоплением водорода на медной пластинке. Это явление ослабления тока в гальваническом элементе называется п о л я р и з а ц и е й элемента.

333. Причины поляризации. Существуют две причины, обусловливающие уменьшение силы тока из-за присутствия водородных пузырьков на положительной пластинке: во-первых, не будучи проводником, водород, собираясь на пластинке, уменьшает полезную площадь пластины и, следовательно, увеличивает внутреннее сопротивление элемента; во-вторых, скопление водорода на медной пластинке уменьшает электродвижущую силу элемента, потому что при этом происходит как бы замена медной пластины водородной, а мы раньше видели (§ 321), что изменение какого-либо материала, из которого изготовлен элемент, изменяет его электродвижущую силу. В том, что при поляризации элемента имеет место действительное падение электродвижущей силы, так же как и увеличение внутреннего сопротивления, можно непосредственно убедиться следующим образом,

Нагрейте полоску блестящей чистой листовой меди в пламени бунзеновской горелки до тех пор, пока она не покроется черным налетом окиси меди, а затем охладите ее на воздухе. (Если медную полоску погрузить для охлаждения в воду, то слой окиси меди почти весь сойдет с нее.) Поместите ее в разбавленную кислоту с цинковой пластинкой и устройте, таким образом, простейший гальванический элемент. Если соединить такой элемент с демонстрационным гальванометром среднего сопротивления, то сила тока будет оставаться без изменения до тех пор, пока будет оставаться кислород, с которым соединяется водород, попадающий на медную пластину. Когда запас кислорода будет исчерпан, водородные пузырьки начнут появляться на медной пластинке, и в тот же момент сразу же уменьшится сила тока.

Различные типы наиболее употребительных гальванических элементов отличаются друг от друга главным образом приспособлениями, служащими для того, чтобы отводить водородные пузырьки или препятствовать их образованию.

Наиболее часто встречающиеся типы таких элементов описаны в следующих параграфах.

334. Элемент Даниеля. Элемент Даниеля состоит из цинковой пластинки, погруженной в раствор серной кислоты, и медной пластинки, погруженной в раствор медного купороса; обе жидкости отделены друг от друга неглазированной глиняной перегородкой.

Таким образом, на отрицательной пластинке вместо водорода выделяются ионы меди, благодаря чему элемент обладает весьма постоянной электродвижущей силой, равной 1,08 вольта. Применяется он в тех случаях, когда требуется ток постоянной силы.

335. Нормальный элемент Вестона; вольт. Этот элемент имеет положительный электрод, состоящий из ртути, соприкасающейся с сернокислой ртутью, и отрицательный электрод из кадмиевой амальгамы в насыщенном растворе сернокислого кадмия (рис. 289). Элемент этот весьма легко изготовляется и обладает настолько постоянной электродвижущей силой, что по международному соглашению был принят за эталон, служащий для точных определений и сравнения электродвижущих сил и разностей потенциалов.

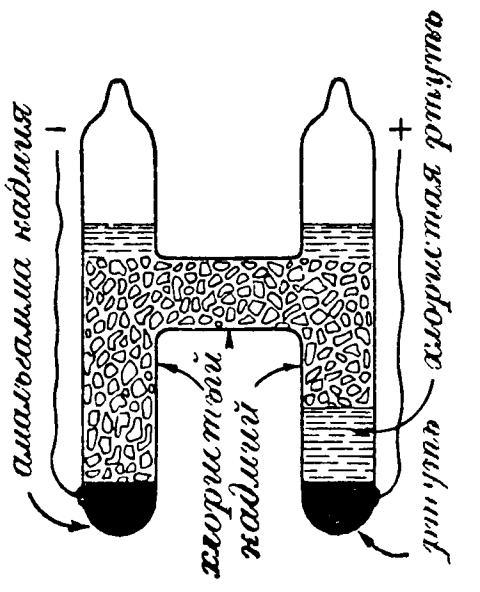


Рис. 289. Нормальный элемент Вестона.

Электродвижущая сила нормального элемента Вестона при 20° С принимается равной 1,0183 вольта. По международному соглашению вольт определяется как «электрическое напряжение, равное $\frac{1}{1{,}0183}$ напряжения, создаваемого нормальным элементом Вестона».

336. Элемент Лекланше. Элемент Лекланше (рис. 290) состоит из цинковой палочки в растворе нашатыря (150 *г* на литр воды) и угольной пластинки, помещенной внутри пористого стакана, наполненного перекисью марганца и графитовым или угольным порошком. Так же как и в простом элементе, цинк здесь растворяется в жидкости, причем водород выделяется на угольной, или положительной, пластинке; затем он медленно поглощается перекисью марганца.

Однако этот процесс происходит слишком медленно, для того чтобы предотвратить быструю поляризацию в тех случаях, когда от элемента берется максимальный ток. В то время когда элемент не работает, оставаясь разомкнутым, он медленно восстанавливается. Электродвижущая сила элемента Лекланше составляет около 1,5 вольта, а его начальное внутреннее сопротивление — немногим меньше одного ома. Следовательно, он может дать мгновенный ток от одного до трех ампер.

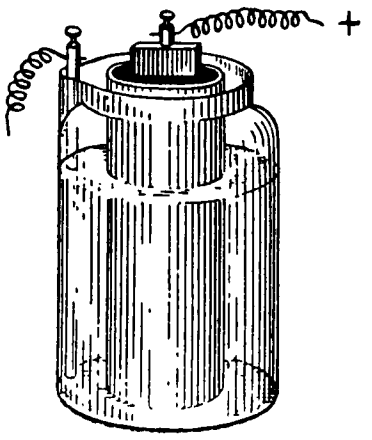


Рис. 290. Элемент Лекланше.

Огромным преимуществом подобного рода элементов является то обстоятельство, что в элементе с разомкнутой цепью цинк совершенно не разъедается нашатырем и что, следовательно, в отличие от элемента Даниеля, он может оставаться в бездействии без всякого для себя вреда в течение неопределенно долгого времени. Элементы Лекланше находят применение главным образом в тех случаях, когда требуется только мгновенный ток, как, например, в домашних электрических звонках. Элемент не требует за собой никакого ухода, если не считать необходимости доливать испаряющуюся воду или нашатырь (NH_4Cl), для того чтобы в растворе не иссякал запас положительных ионов NH_4 и отрицательных ионов Cl.

337. Сухой элемент. Сухой элемент (рис. 291) представляет собой видоизменение элемента Лекланше. Он не является, собственно говоря, совершенно с у х и м, потому что смесь внутри его представляет собой влажную пасту. Обыкновенный сухой элемент содержит около 100 *г* воды. Цинковая пластинка имеет форму цилиндрической банки, содержащей влажную черную смесь, в которой помещается угольная пластинка. Смесь эта состоит из нашатыря, черной окиси марганца, хлористого цинка, нефтяного кокса в порошке и небольшого количества графита. Так же как и в элементе Лекланше, ток создается действием на цинк нашатыря. Перекись марганца служит для устранения поляризации, вызываемой водородом. Задачей $ZnCl_2$ является устранение поляризации, создаваемой аммиаком. Графит уменьшает внутреннее сопротивление, которое в свежем элементе обычных размеров может быть меньше $\frac{1}{20}$ ома. Благодаря малому внутреннему сопротивлению эти элементы могут давать при коротком замыкании 30 и даже более ампер; благодаря их чрезвычайному удобству ежегодное их производство составляет много десятков и сотен миллионов.

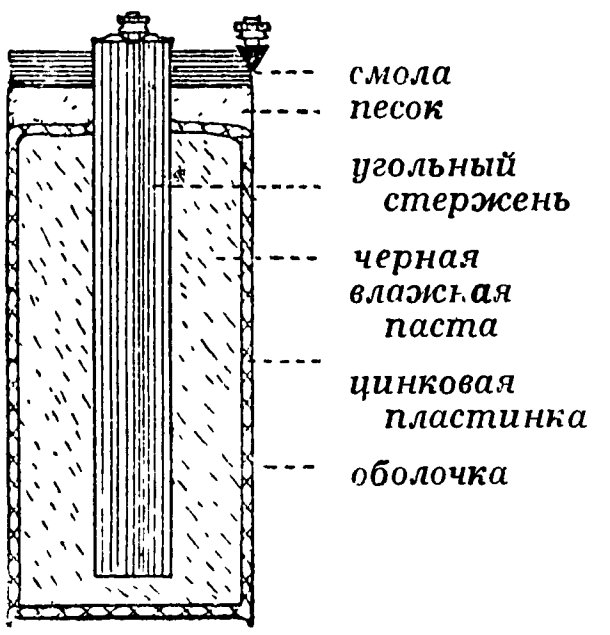


Рис. 291. Сухой элемент.

338. Соединение элементов в группы. Существуют два способа соединения элементов в группы: способ п о с л е д о в а т е л ь н о г о соединения и способ п а р а л л е л ь н о г о соединения. При последовательном соединении цинковый электрод одного эле-

мента соединяется с медным электродом второго, цинковый электрод второго — с медным электродом третьего и т. д. Наконец, медный электрод первого и цинковый электрод последнего присоединяются к концам внешнего сопротивления (см. рис. 292). Электродвижущая сила такой группы равна сумме электродвижущих сил отдельных элементов. Внутреннее сопротивление группы последовательно соединенных элементов также равно сумме внутренних сопротивлений отдельных элементов. Отсюда следует, что если внутренние сопротивления очень малы, то сила тока, получаемого от такой группы, не превзойдет силы тока от одного элемента, потому что общее сопротивление цепи возрастет в том же отношении, как и полная электродвижущая сила. Однако, если внешнее сопротивление велико, то сила тока, создаваемого группой элементов, может значительно превзойти силу тока, получаемого от одного элемента. Применив закон Ома, легко определить искомую силу тока; действительно, если n элементов соединено последовательно и если электродвижущая сила одного элемента равна E, то общая электродвижущая сила в цепи составит nE. Следовательно, если R_e представляет внешнее сопротивление, а R_i — внутреннее сопротивление отдельного элемента, то тогда закон Ома дает

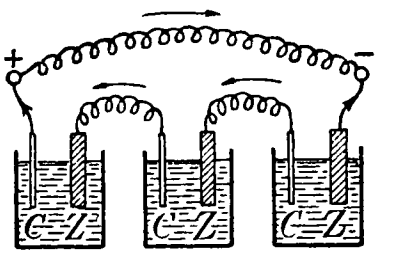
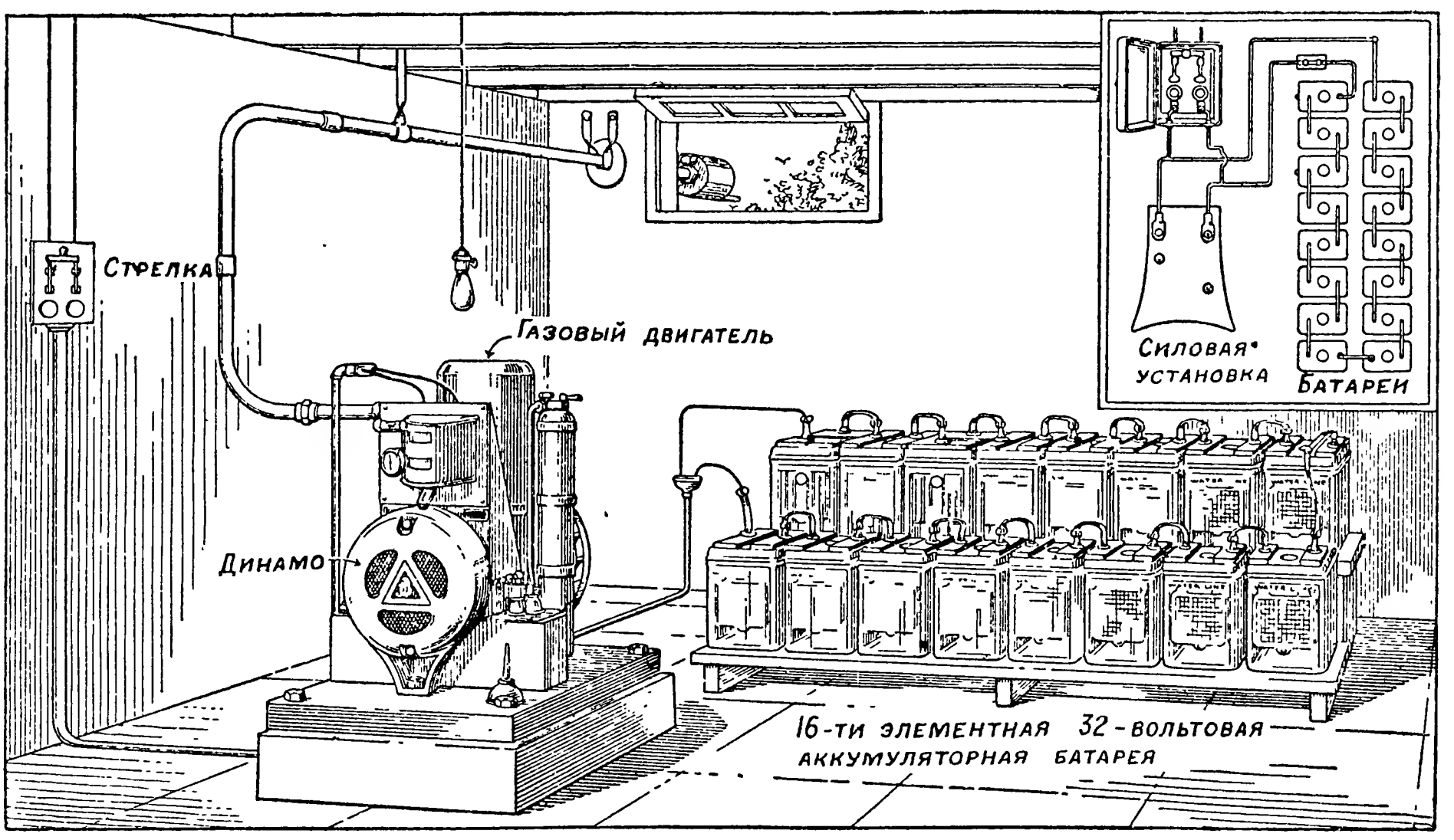


Рис. 292. Элементы, соединенные последовательно.

$$I = \frac{nE}{R_e + nR_i}.$$



НЕБОЛЬШАЯ ОСВЕТИТЕЛЬНАЯ И СИЛОВАЯ СТАНЦИЯ ДЛЯ СЕЛЬСКИХ ДОМОВ.

Маленькая станция состоит из небольшого бензинового двигателя, динамо и аккумуляторной батареи. Генератор заряжает батарею, которая дает ток, когда генератор не работает, и регулирует нагрузку при его работе. При малой нагрузке генератора часть его энергии расходуется на зарядку аккумуляторов, которые разряжаются, при большой нагрузке помогая генератору.

Если n элементов соединено параллельно, т. е. если все медные электроды соединены между собой, а все цинковые — между собой, как на рис. 294, то электродвижущая сила такой группы равна электродвижущей силе одного только элемента, между тем как внутреннее сопротивление составляет $\frac{1}{n}$ внутреннего сопротивления одного элемента, так как такой способ соединения элементов равносилен увеличению площади пластин в n раз. Сила тока, получаемого при таком способе соединения, определяется формулой

$$I = \frac{E}{R_e + \frac{R_i}{n}}.$$

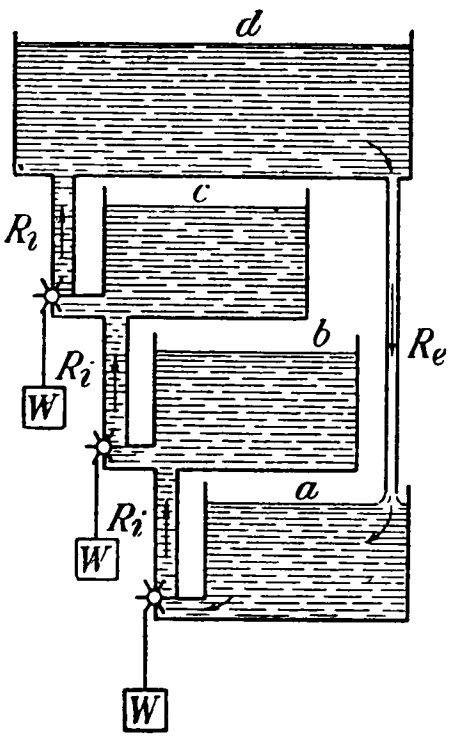


Рис. 293. Гидравлическая аналогия элементов, соединенных последовательно.

Если, следовательно, R_e настолько мало, что им можно пренебречь, как, например, в случае тяжелой медной проволоки, то сила тока во внешней цепи будет в n раз больше, чем в том случае, когда имеется только один элемент. Рисунки 293 и 295 объясняют с помощью гидравлической модели, почему электродвижущая сила элементов, соединенных последовательно, равна сумме электродвижущих сил отдельных элементов и почему электродвижущая сила элементов, соединенных параллельно, остается равной электродвижущей силе одного элемента. Подводя итоги сказанному, мы можем установить следующие правила, которыми нужно руководствоваться при соединении элементов: если R_e велико по сравнению с R_i, то следует соединять элементы последовательно; если же R_i велико по сравнению с R_e, то их следует соединять параллельно.

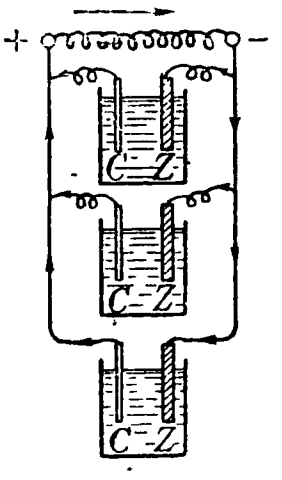


Рис. 294. Элементы, соединенные параллельно.

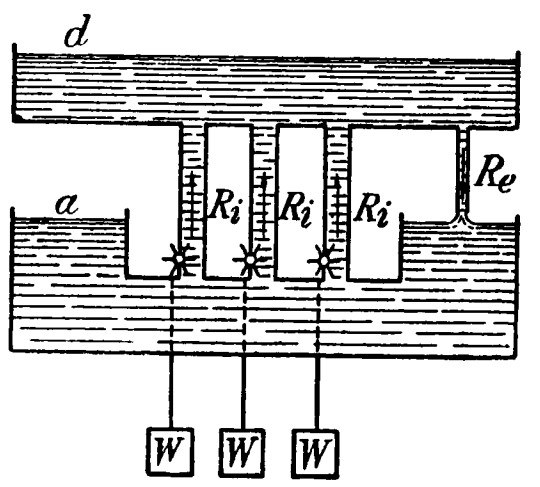


Рис. 295. Гидравлическая аналогия элементов, соединенных параллельно.

Резюме. **Одна из пластин элемента разъедается, в то время как на другой выделяется какое-нибудь вещество.**

Поляризация в простом элементе вызывается скоплением водорода на неразъеденной пластинке.

При последовательном соединении одинаковых элементов электродвижущая сила и внутреннее сопротивление увеличиваются прямо пропорционально числу элементов.

При параллельном соединении одинаковых элементов электродвижущая сила не увеличивается; внутреннее же сопротивление такой группы равно внутреннему сопротивлению одного элемента, деленному на число элементов.

Применение закона Ома к группе элементов. Сила тока равна общей электродвижущей силе группы, деленной на сумму сопротивлений внешней цепи и всей группы.

Вопросы и задачи.

1. 1) Какие положительные и отрицательные ионы находятся в разбавленном растворе H_2SO? 2) Зарядом какого знака обладают ионы Zn, когда атомы цинка вытесняются кислотой из цинковой пластины элемента в раствор? Какой заряд остается при этом на цинковом электроде? 3) Что делают эти положительные ионы с положительными водородными ионами вблизи цинкового электрода? 4) Что происходит с положительными зарядами водородных ионов, когда они достигают другой пластинки? 5) Почему по проволоке, соединяющей электроды гальванического элемента, проходит ток?

2. Почему элемент Лекланше лучше элемента Даниеля для обслуживания домашних электрических звонков?

3. Почему сухие элементы непригодны для такой телеграфной линии, как изображенная на рис. 275? Почему их можно применить на телеграфной линии, представленной на рис. стр. 280.

4. От сухого элемента, обладающего электродвижущей силой в 1,5 вольта, был получен через амперметр весьма малого сопротивления ток силою в 30 ампер. Определите внутреннее сопротивление элемента.

5. Объясните, почему при непосредственном приключении сухого элемента к амперметру сила тока быстро падает.

6. Начертите схему трех проволок, соединенных последовательно, и трех элементов, тоже соединенных последовательно. Если сопротивление каждой проволоки равно 0,1 ома, то как велико сопротивление всей группы? Если сопротивление отдельного элемента составляет 0,1 ома, то чему равно внутреннее сопротивление всей группы?

7. Начертите схему трех проволок, соединенных параллельно, и трех элементов, также соединенных параллельно. Если сопротивление каждой проволоки составляет 6 омов, то чему равно общее сопротивление всех трех проволок? Если внутреннее сопротивление отдельного элемента равно 6 омам, то как велико сопротивление группы?

8. Элемент, обладающий внутренним сопротивлением в 0,05 ома и электродвижущей силой в 1,5 вольта, соединен с тремя сопротивлениями, по 12 омов каждое. Вычислите силу тока, проходящего по цепи: 1) когда три сопротивления соединены параллельно; 2) когда три сопротивления соединены последовательно.

9. Какое открытие было сделано Фарадеем, касающееся влияния времени и силы тока на величину химических изменений, происходящих в элементе (см. § 306)?

10. Если 10 сухих элементов, соединенных последовательно, дают ток общей силою в 10 ампер, и если 10 других сухих элементов, соединенных параллельно, дают в иных условиях 10 ампер во внешней цепи, то каково отношение расхода цинка в первой группе к расходу цинка во второй группе?

11. Четыре новых сухих элемента, соединенных последовательно, питают током силою в 2 ампера электромагнит, соленоид которого обладает сопротивлением в 2,8 ома. 1) Чему равно внутреннее сопротивление каждого сухого элемента, если последний обладает электродвижущей силой в 1,5 вольта? 2) Если соленоид состоял из 100 витков, то каким количеством ампер-витков выражалось производимое им магнитное действие?

12. Обыкновенная телеграфная проволока обладает сопротивлением в 20 омов на 1,61 *км*. Какой силы ток пройдет через линию в 161 *км* от 100 элементов Даниеля, соединенных последовательно и обладающих электродвижущей силой в 1 вольт каждый, если имеются два релэ, сопротивлением в 150 омов каждое, и если внутреннее сопротивление отдельного элемента составляет 4 ома?

13. Если релэ в предыдущей задаче имели катушки по 10 000 оборотов каждое, то сколько ампер-витков служило для намагничивания их электромагнитов?

14. Если бы в описанной выше телеграфной линии вместо релэ были помещены клопферы, с сопротивлением по 3 ома каждый, обладающие 500 витками, то какое количество ампер-витков шло бы на намагничивание их сердечников? Почему электромагнит релэ обладает большим сопротивлением?

ВТОРИЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ.

339. Свинцовые аккумуляторы. Прикрепим две свинцовые пластины размерами 15 × 20 *см* к полосе в 1,5 *см* толщиною из какого-либо изолирующего материала, как на рис. 296, и погрузим в раствор, состоящий из одной части серной кислоты на 10 частей воды. Пропустим затем ток от двух аккумуляторов или трех элементов, соединенных последовательно (*c*), через нашу установку, причем поместим в цепи амперметр *A* или гальванометр малого сопротивления. При прохождении тока с катода (электрода, через который ток выходит из раствора) начнут выделяться водородные пузырьки, в то время как положительный электрод, или анод, начнет приобретать темно-коричневую окраску. В то же самое время показания амперметра станут заметно падать. Коричневый налет представляет собой соединение свинца с кислородом, называемое перекисью свинца (PbO_2), которое образуется благодаря действию на пластину освобождающегося кислорода, так же как и в опыте с электролизом воды (§ 303). Удалим затем из цепи батарею, разомкнув ключ *K* и замкнув ключ K_2, поставим на ее место электрический звонок *B*. Звонок начнет звонить, и амперметр *A* покажет, что теперь проходит ток в направлении, обратном направлению первоначального тока. Этот ток медленно будет ослабевать, по мере того как энергия, которая была запамена в элементе первичным током, расходуется на приведение звонка в действие.

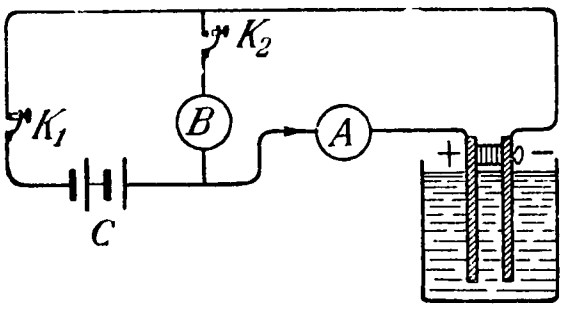


Рис. 296. Основы устройства аккумуляторной батареи.

Этот опыт служит для иллюстрации основ устройства аккумуляторной батареи. Собственно говоря, здесь не происходит никакого накопления (аккумулирования) электричества, а накопляется только химическая энергия.

Две одинаковые свинцовые пластины под действием электрического тока превратились в пластины, обладающие различными свойствами: одна из них осталась без изменений, а на другой появился слой перекиси свинца; другими словами, получился обыкновенный гальванический элемент, потому что последний представляет собой не что иное, как два различных металла, погруженных в электролит. В рассматриваемом случае пластина с перекисью свинца соответствует медному электроду в обыкновенном гальваническом элементе, а свинцовая пластина — цинковому электроду. Наш элемент создает ток, направление которого противоположно направлению зарядного тока, т. е. его электродвижущая сила направлена против электродвижущей силы элементов, служивших для зарядки. Этим и объясняется падение показаний амперметра. Когда зарядный ток выключен, аккумулятор начинает действовать совершенно так же, как первичный гальванический элемент, и дает ток до тех пор, пока не израсходуется тонкий налет перекиси свинца. Единственное существенное отличие настоящего аккумулятора фабричного производства (рис. 297) от того, который был здесь описан, заключается в том,

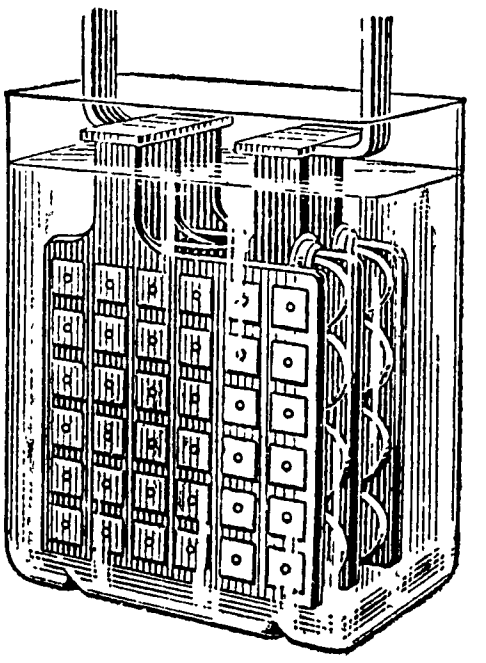


Рис. 297. Свинцовый аккумулятор.

что первый при изготовлении его снабжается значительно более толстым слоем «активного вещества» (перекисью свинца на положительной пластинке и пористым губчатым свинцом на отрицательной), чем тот слой, который может быть получен при однократной зарядке, как у нас. Этим веществом заполняются ячейки в пластинах, как показано на рис. 297. Электродвижущая сила свинцового аккумулятора составляет около 2 вольт. Так как пластины обычно помещаются близко друг к другу и, кроме того, им можно придавать любые размеры, то внутреннее сопротивление обычно мало, так что сила тока, получаемого от такого аккумулятора, может достигнуть значительной величины.

Коэффициент полезного действия свинцового аккумулятора составляет около 75%, т. е. от него может быть получено только $^3/_4$ всей затраченной на зарядку электрической энергии. Для того чтобы узнать, до какой степени аккумулятор з а р я ж е н, необходимо определить удельный вес (плотность) электролита (рис. 298).

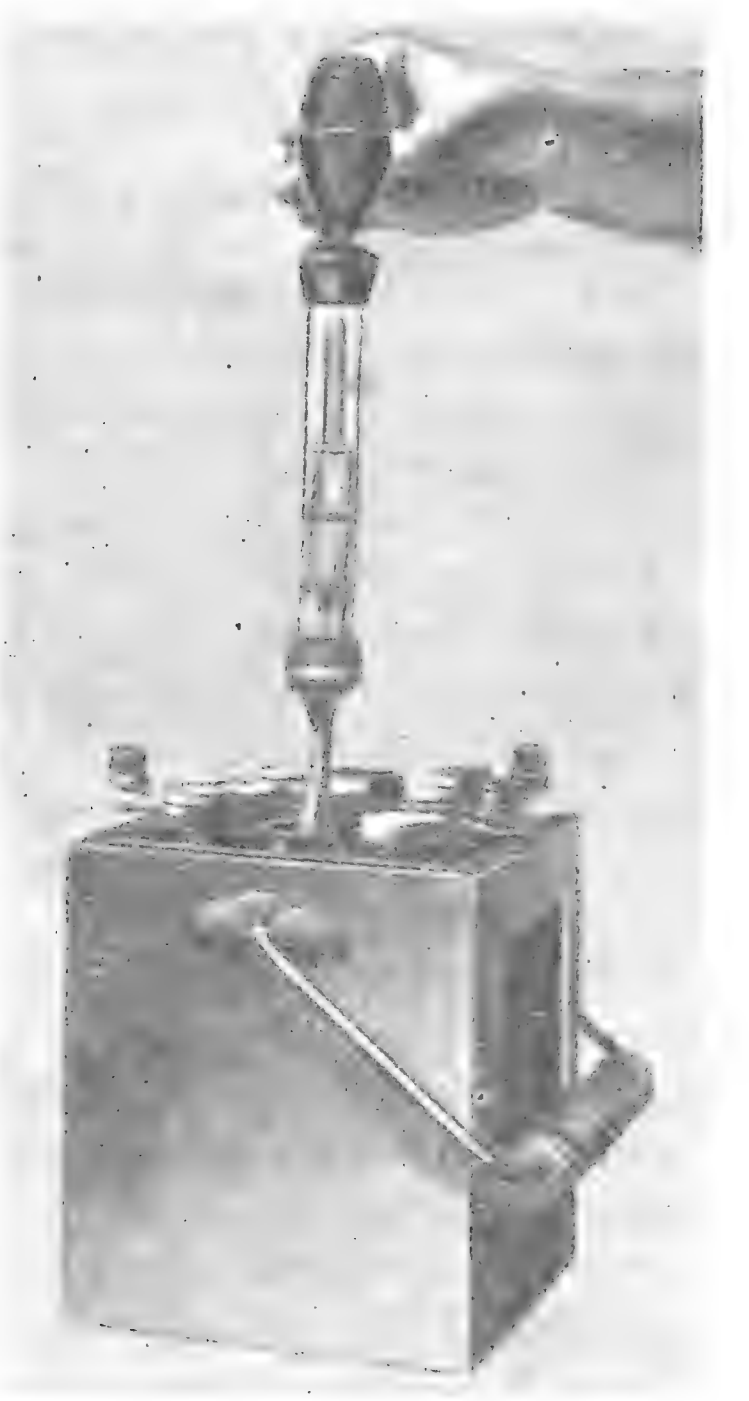


Рис. 298. Определение удельного веса электролита.

340. Железо-никкелевые аккумуляторы. Т о м а с А. Э д и с о н изобрел и усовершенствовал железо-никкелевые аккумуляторы, в которых электролитом служит 21% раствор едкого кали в воде с небольшим количеством гидроокиси лития. Отрицательные пластины содержат железный порошок, находящийся в высверленных плоских, прямоугольных ячейках, а положительные пластины содержат двуокись никкеля в просверленных цилиндрических отверстиях.

Эдисоновский аккумулятор весит в два раза меньше свинцового аккумулятора одинаковой с ним емкости и не требует за собой столь тщательного ухода, как последний. Его электродвижущая сила составляет около 1,2 вольта. Недостатком этих аккумуляторов является их сравнительно большое внутреннее сопротивление; главным их применением является питание двигателей электрических тележек и аккумуляторных трамвайных вагонов. Коэффициент полезного действия эдисоновских аккумуляторов немного меньше, чем свинцовых.

Резюме. **Энергия электрического тока производит в аккумуляторе работу, заряжая последний и запасая таким образом потенциальную энергию в форме химической энергии.**

Когда аккумуляторная батарея разряжается, запасенная в ней химическая энергия превращается обратно в электрическую энергию.

Вопросы и задачи.

1. Пластина с перекисью свинца, так же как и пластина с двуокисью никкеля, называются п о л о ж и т е л ь н ы м и. Какое действие производит в пластинах зарядный ток?

2. Как лучше будет сказать: при зарядке аккумулятора ток входит в элемент или проходит ч е р е з н е г о? Что при этом запасается?

3. Если в автомобиле имеются лампы на 6 вольт, то сколько нужно при этом иметь свинцовых аккумуляторов? Эти аккумуляторы должны быть соединены последовательно или параллельно?

4. Если вы попытаетесь зарядить аккумуляторную батарею током того же самого напряжения, как и сама батарея, то что из этого выйдет? Объясните.

ТЕПЛОВЫЕ ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА.

341. Теплота, развиваемая в проволоке электрическим током. Коснитесь зажимами двух или трех сухих элементов, соединенных последовательно, концов железной или нейзильберовой проволоки № 40 длиною около 7 *мм*. Проволока нагреется до белого (красного) каления и, по всей вероятности, расплавится.

Опыт показывает, что при прохождении тока через проволоку энергия электрического тока превращается в тепловую энергию. Электрическая энергия, затрачиваемая при прохождении тока, может расходоваться различными способами. Например, она может производить химическое разложение, как в случае зарядки аккумулятора, или совершать механическую работу, как при приведении в действие электрического двигателя, или, наконец, она может целиком затрачиваться на нагревание проволоки, как в описанном опыте. Здесь энергия все-таки расходуется, хотя при этом и не происходит никаких химических или механических превращений (см. стр. 240).

342. Энергия электрического тока. В главе VII мы нашли, что энергия, затраченная в водяной турбине, равна произведению количества прошедшей через турбину воды на величину разности уровней воды, или мощность равна произведению разности уровней н а с и л у п о т о к а. Точно таким же образом можно найти, что мощность (количество работы в единицу времени), создаваемая током, проходящим по проводнику, выражается произведением п а д е н и я п о т е н ц и а л а между концами проводника на с и л у э л е к т р и ч е с к о г о т о к а. Если разность потенциалов измерять в вольтах, а силу тока — в амперах, то мощность выразится в ваттах, и мы получим

вольты × амперы = ватты.

Такое соотношение получается в результате сделанного нами выбора единиц. Э н е р г и я электрического тока обычно измеряется в к и л о в а т т - ч а с а х.

К и л о в а т т - ч а с п р е д с т а в л я е т с о б о й к о л и ч е с т в о э н е р г и и, с о з д а в а е м о е в т е ч е н и е ч а с а т о к о м, м о щ н о с т ь к о т о р о г о, и л и с к о р о с т ь р а с х о д о в а н и я э н е р г и и, р а в н а о д н о м у к и л о в а т т у.

343. Количество теплоты, развиваемое током. Так как одна калория равна 42 000 000 эргов, 1 ватт (10 000 000 эргов в секунду) развивает в течение одной секунды 0,24 калории. Следовательно, количество калорий H, развиваемое в течение t секунд током силою в I ампер при прохождении его по проводнику, между двумя точками которого разность потенциалов составляет V вольт, выражается уравнением

$$H = 0{,}24\, IVt.$$

Приняв во внимание закон Ома, согласно которому $V = IR$, получим окончательно

$$H = 0{,}24\, I^2Rt,$$

или количество теплоты, выделяющееся в проводнике, пропорционально протекшему промежутку времени, сопротивлению и квадрату силы тока.

344. Лампы накаливания. Обыкновенная лампа накаливания (рис. 299) состоит из вольфрамовой нити, нагреваемой током до белого каления.

Так как на воздухе нить сгорела бы в несколько секунд, ее помещают в хорошо откачанный баллон. Во время службы нить медленно испаряется, вследствие чего на внутренней поверхности баллона появляется темный похожий на зеркало налет металла. Проволочки, подводящие питающий ток, припаяны — одна к основанию A цоколя, а другая — к его ободку B, служащим электродами, через которые ток попадает в лампу и выходит из нее. Проволочки w, w, впаянные в стенки баллона, должны иметь такой же, как у стекла, коэффициент теплового расширения, для того чтобы воспрепятствовать попаданию в баллон воздуха.

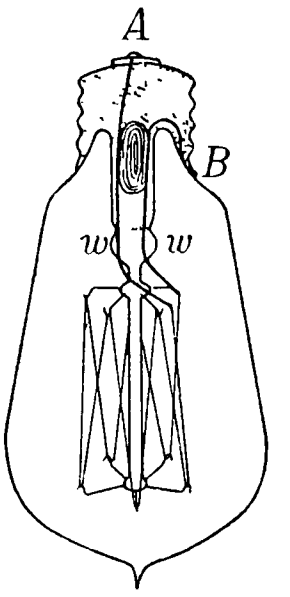


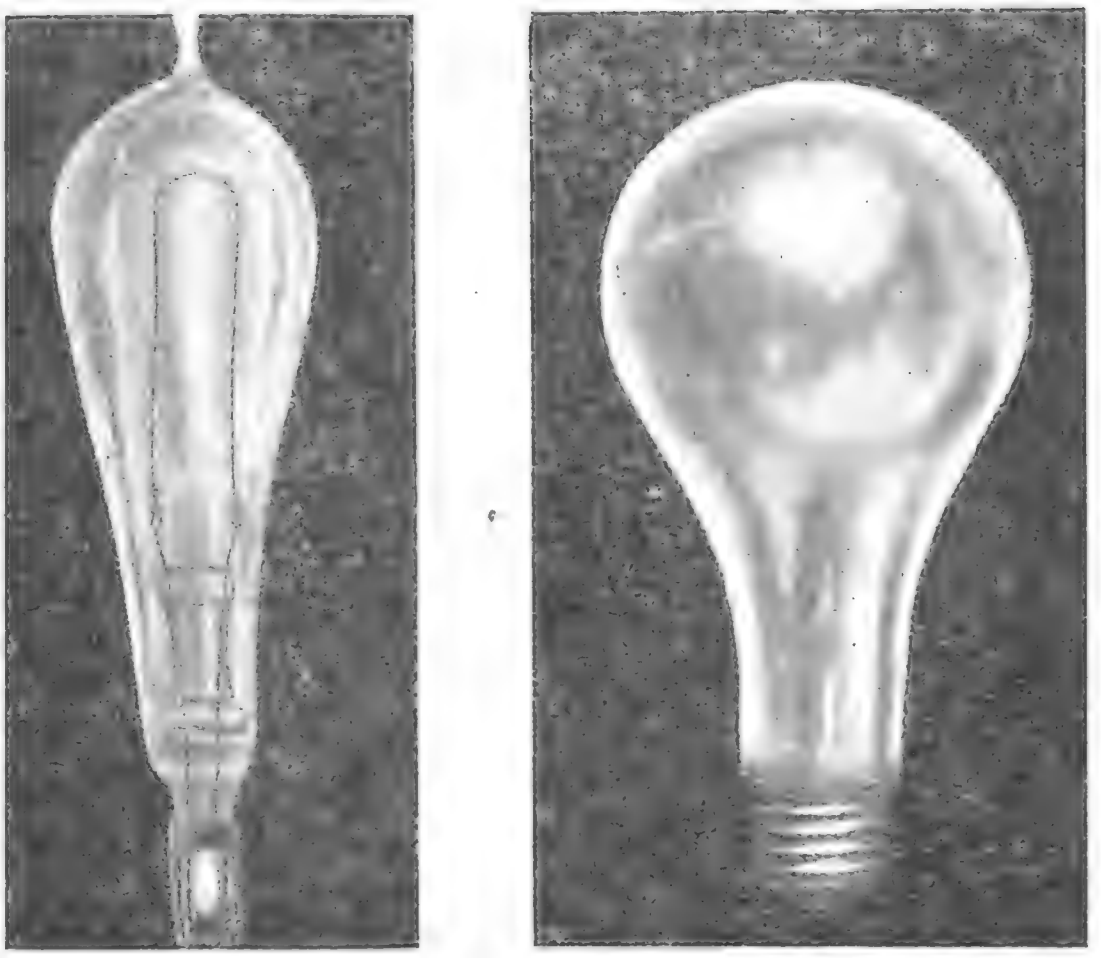
Рис. 299. Вольфрамовая пустотная лампа.

Лампы накаливания обычно соединяются — последовательно или параллельно — в группы, присоединяемые к цепи, в которой поддерживается у зажимов ламп (стр. 251) напряжение немного более 100 вольт. Потребление энергии составляет около 1,25 ватта на свечу для лампы обыкновенных размеров. Вольфрамовые нити, которые служат при значительно более высокой температуре, чем уже выходящие из употребления угольные нити, обладают коэффициентом полезного действия, который почти в три раза больше, чем в случае угольных нитей.

Большие старания должны быть приложены к удалению не только воздуха, но и следов водяного пара, который прочно оседает на поверхности стекла. С целью его удаления баллон нагревается не ниже, чем до 300° С в присутствии небольшого количества красного фосфора. При этом достигается разрежение, соответствующее давлению оставшегося воздуха, равному 0,001 *мм* ртутного столба. Срок жизни этих ламп составляет от 1000 до 2000 часов.

Потребитель обычно платит за освещение по количеству израсходованных киловатт-часов. Мощность, потребляемая лампой, пи-

таемой током силой в $^1/_4$ ампера и напряжением в 100 вольт, составляет 25 ватт. Две такие лампы за 4 часа горения израсходуют, следовательно, $2 \times 4 \times 25 = 200$ ватт-часов или 0,200 киловатт-часа. Для измерения и записи расхода энергии служит электрический счетчик (рис. 324).



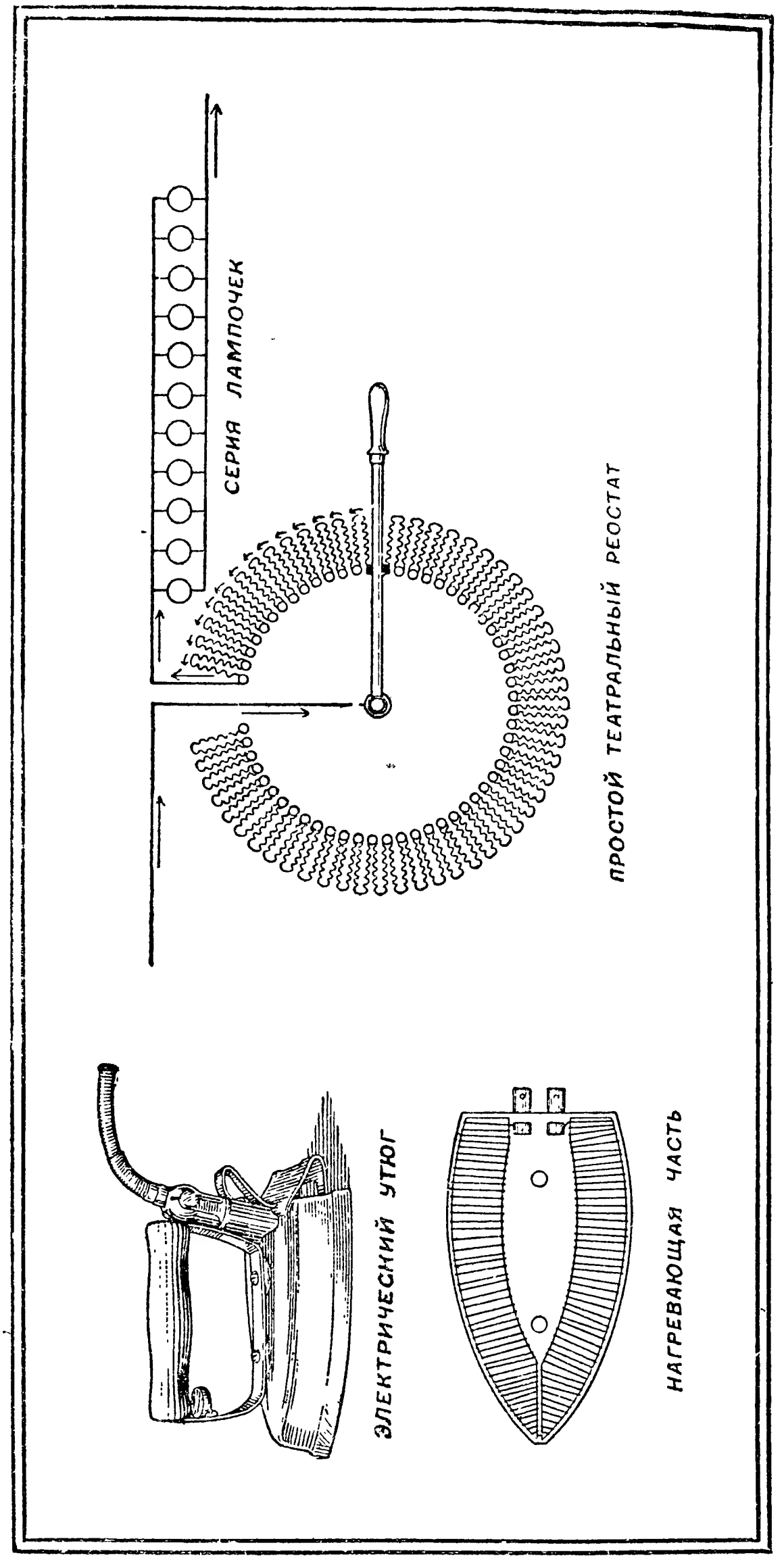
ЭДИСОНОВСКАЯ И СОВРЕМЕННАЯ ЛАМПОЧКА.

В 1879 г. Томас Эдисон изобрел угольную пустотную лампу с большим сопротивлением. Чтобы включать эти лампы параллельно (единственный практичный метод для домов), он придумал для распределения тока особую систему, принятую до сих пор. В 1911 г. Вильям Кулидж, после многих лет работы, открыл метод изготовления вольфрама, поддающегося протягиванию в проволоку, а в 1913 г. Ирвинг Лэнгмуир придумал чрезвычайно производительную наполненную газом вольфрамовую лампочку. Эти два открытия сделали лампочку накаливания главным современным осветителем значительно более экономным, чем угольная лампочка. На левом рисунке — ранняя эдисоновская угольная пустотная лампочка. Она появилась на рынке в 1880 г. Длина ее была — 17 *см*, она потребляла 100 ватт и давала около 16 свечей. Направо — последний вид газонаполненной лампочки с проволочной спиралькой. Ее длина — 15 *см*, она тоже потребляет 100 ватт, но дает около 132 свечей. Газ, заполняющий ее, — аргон с небольшой примесью азота (чистый азот ионизуется при температуре горения лампы, и может произойти короткое замыкание). Груша — снаружи гладкая, а изнутри — шероховатая, — внутренние неровности заполнены прозрачной средой, дающей стеклу возможность пропускать весь свет. Лампы, шероховатые снаружи, поглощают 6—20% света.

Весьма экономичный вид лампы накаливания с вольфрамовой нитью получается при наполнении баллона аргоном (рис. 300). Длинная нить для уменьшения теплового излучения свертывается в чрезвычайно тонкую спираль. Как мы уже знаем (§ 206), присутствие газа затрудняет испарение; поэтому благодаря присутствию аргона температура нити может быть поднята до 2 400° С, т. е. до значительно более высокой температуры, чем это возможно в вакууме. При этом небольшое увеличение силы тока влечет за собой значительное увеличение силы света. Кроме того в газонаполненных лампах благодаря конвекции металлическое зеркало, обусловленное испарением нити, образуется у верхушки балона, где оно не ослабляет силы света. Газонаполненные лампы больших размеров потребляют только 0,6 ватта на свечу (см. стр. 251).

В настоящее время производство ламп накаливания достигло огромных размеров. Существуют предприятия, выпускающие 3000 ламп ежеминутно.

345. Свет угольной дуги. Если сблизить до соприкосновения концы двух угольных стержней, помещенных в цепь мощного электрического генератора, то уголь в точке соприкосновения нагреется до красного каления. Если затем раздвинуть концы угольных стержней на расстояние 0,5 *см*,



ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Электрические приборы с сопротивлением превращают электрическую энергию в тепло и регулируют силу тока. Например, электрические печи, утюги, чайники, грелки и предохранители потребляют тепло, развиваемое током, а реостаты употребляются для регулировки тока. На рисунке слева показан утюг, состоящий из нихромовой ленты, намотанной на слой слюды. Обыкновенный утюг потребляет почти 600 ватт, т. е. энергию, достаточную для десяти 60-ватных лампочек. Направо показано устройство театральных реостатов.

то ток будет продолжать итти, потому что между электродами образуется проводящий слой раскаленных паров, называемый э л е к т р и ч е с к о й д у г о й. Вид дуги представлен на рис. 301. На положительном конце образуется углубление или кратер, в то время как отрицательный электрод

приобретает конусообразную форму, как показано на рис. 301. Угли расходуются со скоростью около 2,5 *см* в час, причем положительный уголь сгорает почти в два раза быстрее отрицательного. Свет испускается преимущественно положительным кратером, где температура достигает 3 700°С; это представляет наиболее высокую полученную до сих пор температуру.

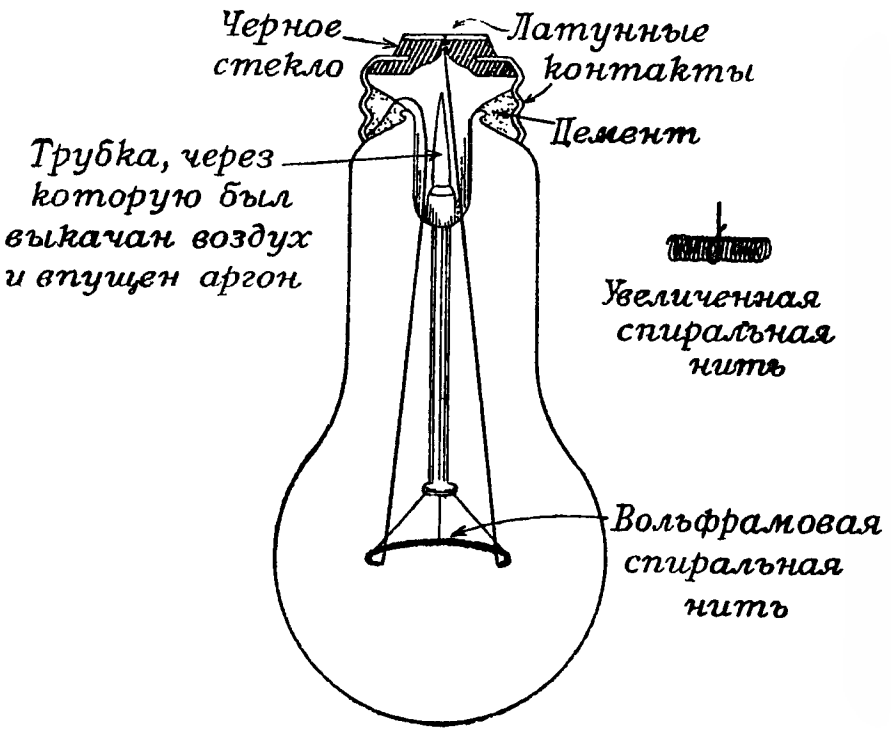


Рис. 300. Газонаполненная лампа с тонкой спиральной нитью.

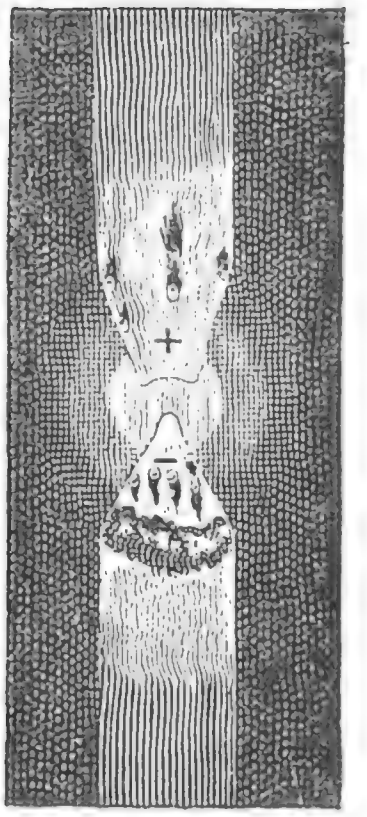


Рис. 301. Свет от дуги.

При температуре электрической дуги все известные вещества обращаются в пар.

Свет дуговой лампы создается теплотой, которая выделяется благодаря сопротивлению цепи, а не вследствие действительного сжигания или горения.

Мощные дуговые лампы в настоящее время почти совсем уже вышли из употребления и находят применение только в осветительных установках для киносъемок, в прожекторах и в маяках.

346. Ртутная дуговая лампа Купера-Хьюитта. Ртутная дуговая лампа К у п е р а - Х ь ю и т т а (рис. 302) отличается от угольной дуговой лампы тем, что раскаленным телом в ней является длинный столб ртутного пара. Лампа состоит из выкачанной трубы длиною от 1 до 1,5 *м*; положительным электродом служит железная пластинка, расположенная наверху; отрицательным электродом — небольшое количество ртути на дне. До того как лампа начинает гореть, все пространство внутри нее представляет почти совершенный вакуум, через который, несмотря на приложенную разность потенциалов, ток не может проходить. Для того чтобы привести лампу в действие, нижний конец ее приподнимают и затем сразу же опускают. При этом образуется на мгновение непрерывный проводящий столб ртути, благодаря дуге, образующейся при его разрыве, выделяется теплота, наполняющая трубку ртутным паром. Таким образом получается в парах ртути длинная дуга, простирающаяся от одного конца трубки до другого. Дуга эта испускает весьма яркий свет, в котором, однако, почти совершенно отсутствуют красные лучи. Обилие в свете ртутной дуги фиолетовых лучей делает ее особенно пригодной для фотографии. Об экономичности дуги можно судить хотя бы по тому, что она потребляет около 0,6 ватта на свечу. Лампы К у п е р а - Х ь ю и т т а с кварцевыми трубками употребляются

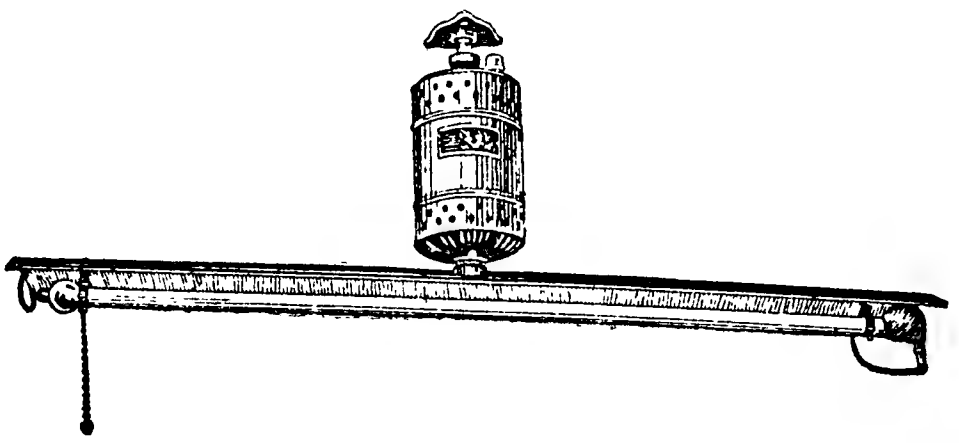


Рис. 302. Дуговая ртутная лампа Купера-Хьюитта.

для стерилизации, так как кварц пропускает ультра-фиолетовые лучи, которые обладают бактерицидными свойствами (способностью убивать бактерии).

Резюме. **Электрическая мощность измеряется ваттами (§ 145). 746 ватт = = 1 лош. силе (*H. P.*). Ватты = вольты × амперы.**

Электрическая энергия измеряется киловатт-часами.

Количество калорий, развиваемых электрическим током в течение некоторого промежутка времени, равно $0{,}24I^2Rt$ (t – время в секундах).

Вопросы и задачи. [1]

1. Если автомобильная аккумуляторная батарея обладает электродвижущей силой в 6 вольт и дает при пуске машины мгновенный ток в 200 ампер, то чему равняется ее мощность в ваттах? В киловаттах? В лошадиных силах?

2. Если одна из проволочных петель лампы накаливания с вольфрамовой нитью замкнулась накоротко, то какое действие произведет это на силу тока, проходящего через лампу? На яркость нити? На продолжительность горения лампы?

3. Что называется 104-вольтовой лампой? Что произойдет с такой лампой, если разность потенциалов на ее зажимах возрастет до 500 вольт? Трамвайные вагоны питаются обычно током в 500 вольт; как можно пользоваться для их освещения 100-вольтовыми лампами?

4. 50-вольтовая угольная лампа, которая питается током в 1 ампер, дает почти столько же свечей, как и 100-вольтовая лампа, питаемая током в $^1/_2$ ампера. Объясните причины этого явления.

5. Обыкновенная электрическая лампочка потребляет 25 ватт и питается током силою в $^1/_2$ ампера. Свежий сухой элемент при замыкании накоротко дает 30 и даже больше ампер. Будет ли лампочка гореть от элемента? (Проверьте ваш ответ на опыте.)

6. Сколько 25-ваттных лампочек накаливания, соединенных параллельно, можно употреблять одновременно в домашней осветительной сети напряжением в 110 вольт, рассчитанной на ток в 10 ампер?

7. Электрический утюг, потребляющий 5 ампер в сети напряжением в 110 вольт, действовал в течение 25 минут. 1) Каково его сопротивление? 2) Какое количество ватт он расходует? 3) Сколько стоила израсходованная энергия при тарифе в 24 коп. за киловатт-час?

8. В течение какого времени расход на энергию составит 2 коп., если горит 25-ваттная лампа при стоимости энергии 20 коп. за киловатт-час?

9. Небольшая дуговая лампа требует для своего питания ток силою в 5 ампер при разности потенциалов на ее зажимах в 45 вольт. Какой величины сопротивление нужно включить последовательно с лампой для того, чтобы ее можно было употреблять в цепи с напряжением в 110 вольт?

10. Сопротивление спирали для кипячения воды равно 20 омам; при последовательном включении ее в осветительную сеть через нее проходит ток силою в 5 ампер. В течение какого времени с ее помощью можно нагреть 480 *г* воды с 10° до 100° С?

11. Электрическая плита питается током силою в 5 ампер и напряжением в 110 вольт. На ней можно поджарить два ломтика мяса в течение 12 минут. 1) Какова мощность (в лошадиных силах), потребляемая плитой? 2) Сколько будет стоить поджарить 12 ломтиков при тарифе в 1,6 коп. за киловатт-час?

ГЛАВА XV.

ИНДУКЦИОННЫЕ ТОКИ.

ОСНОВЫ УСТРОЙСТВА ДИНАМОМАШИН И ДВИГАТЕЛЕЙ.

347. Ток, индуцированный магнитом. Намотайте в виде катушки C диаметром в 5—6 *см* (рис. 303) 400 или 500 оборотов медной проволоки № 22. Присоедините затем эту катушку к чувствительному гальванометру д'А р-

[1] Дополнительные вопросы и задачи к главе XIV даны в приложении.

сонваля. Затем быстро поместите катушку *C* над северным полюсом сильного подковообразного магнита. Отклонение стрелки *p* гальванометра покажет, что через катушку проходит мгновенный ток. Держите катушку неподвижно над магнитом. Стрелка вернется к нулевому положению и остановится. Уберите затем быстро катушку. Стрелка качнется в направлении, противоположном первоначальному отклонению, показывая, что в катушке появился ток обратного направления.

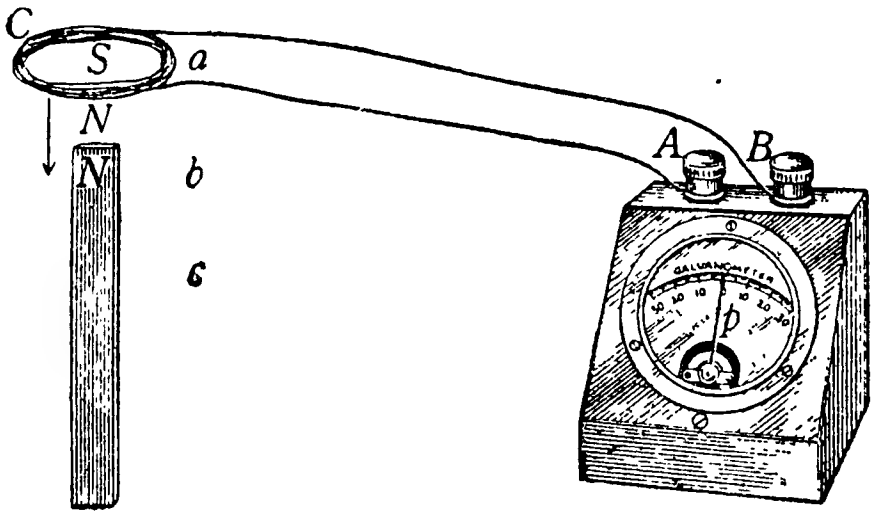


Рис. 303. Индукция электрических токов магнитами.

Таким образом, оказывается, что электрический ток может быть возбужден (индуцирован) в проводнике, если заставить последний двигаться в магнитном поле; магнит не оказывает никакого влияния на проводник, который неподвижен по отношению к полю. Это открытие, одно из наиболее значительных в истории науки, было сделано М. Фарадеем в 1831 г. Оно явилось зародышем большинства современных применений электричества в технике и промышленности.

348. Направление тока индукции. Закон Ленца. Для того чтобы найти направление тока индукции, приложите к зажимам *A* и *B* (рис. 303) весьма малую разность потенциалов от гальванического элемента и заметьте, в какую сторону отклонится стрелка, когда, например, ток войдет через *A*. Это вам сразу покажет, в каком направлении шел ток в катушке *C*, когда последнюю придвинули к северному полюсу магнита. Применив к *C* правило правой руки, мы сможем тогда сказать, какая из поверхностей катушки, обтекаемых током индукции, является северным полюсом магнитного листка, а какая — южным. Таким путем мы найдем, что если катушка была придвинута к северному полюсу магнита, то направление тока индукции в катушке будет такое, которое при движении вниз сделает нижнюю поверхность, обтекаемую током, северным полюсом магнитного листка (рис. 304, 1 и 2), а при движении вверх — южным полюсом (рис. 304, 3 и 4); в первом случае взаимное отталкивание северного полюса магнита и северного полюса катушки стремилось воспрепятствовать движению катушки от *a* к *b*, а взаимное притяжение северного полюса магнита и южного полюса катушки стремилось воспрепятствовать движению катушки при перемещении ее от *b* к *c*. Во втором случае взаимное отталкивание обоих северных полюсов стремилось препятствовать перемещению катушки из положения *c* в положение *b*, а взаимное притяжение северного полюса магнита и южного полюса катушки стремилось воспрепятствовать движению вверх от *b* к *c*. Следовательно, в обоих случаях движение происходило против препятствующей ему силы.

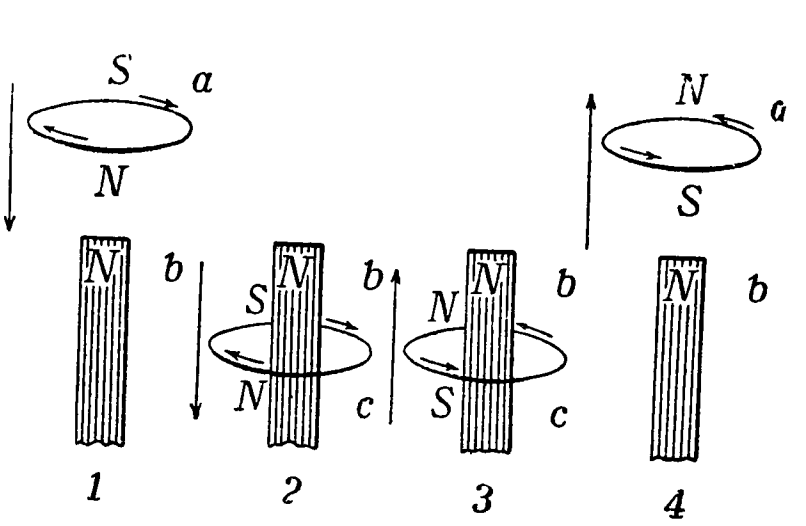


Рис. 304. Иллюстрация закона Ленца.

На основании этих и целого ряда других опытов мы приходим к следующему заключению: направление тока индукции, вызываемого движением магнит-

ного поля и проводника друг относительно друга, всегда таково, что создаваемое этим током магнитное поле противодействует движению, вызывающему появление тока индукции. Это и есть закон, установленный Ленцем. Закон Ленца можно было бы вывести непосредственно из закона сохранения энергии; действительно, этот закон говорит нам, что если электрический ток обладает энергией, то он может быть создан только путем затраты механической работы или какого-либо другого вида энергии.

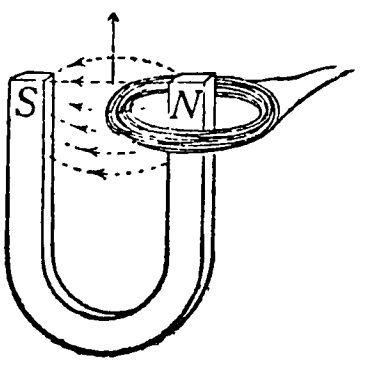


Рис. 305. Токи индуцируются только в тех случаях, когда проводник перерезает силовые линии.

349. Условия, необходимые для возбуждения электродвижущей силы индукции. Будем держать катушку в положении, указанном на рис. 305, и двигать ее взад и вперед параллельно магнитному полю, т. е. параллельно прямой *NS*. Ток индукции при этом не появится.

Подобного рода опытами найдено, что электродвижущая сила индукции появляется в катушке только в том случае, когда при движении катушки относительно поля происходит изменение общего числа магнитных силовых линий, охватываемых катушкой. В более общей форме это правило может быть высказано следующим образом: электродвижущая сила индукции возникает в каком-либо участке проводника тогда и только тогда, когда этот участок движется таким образом, что перерезает магнитные силовые линии.[1]

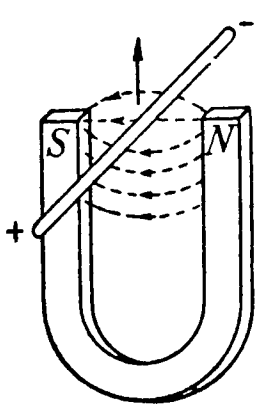


Рис. 306. Электродвижущая сила индуцируется всегда, если прямолинейный проводник перерезывает магнитные силовые линии.

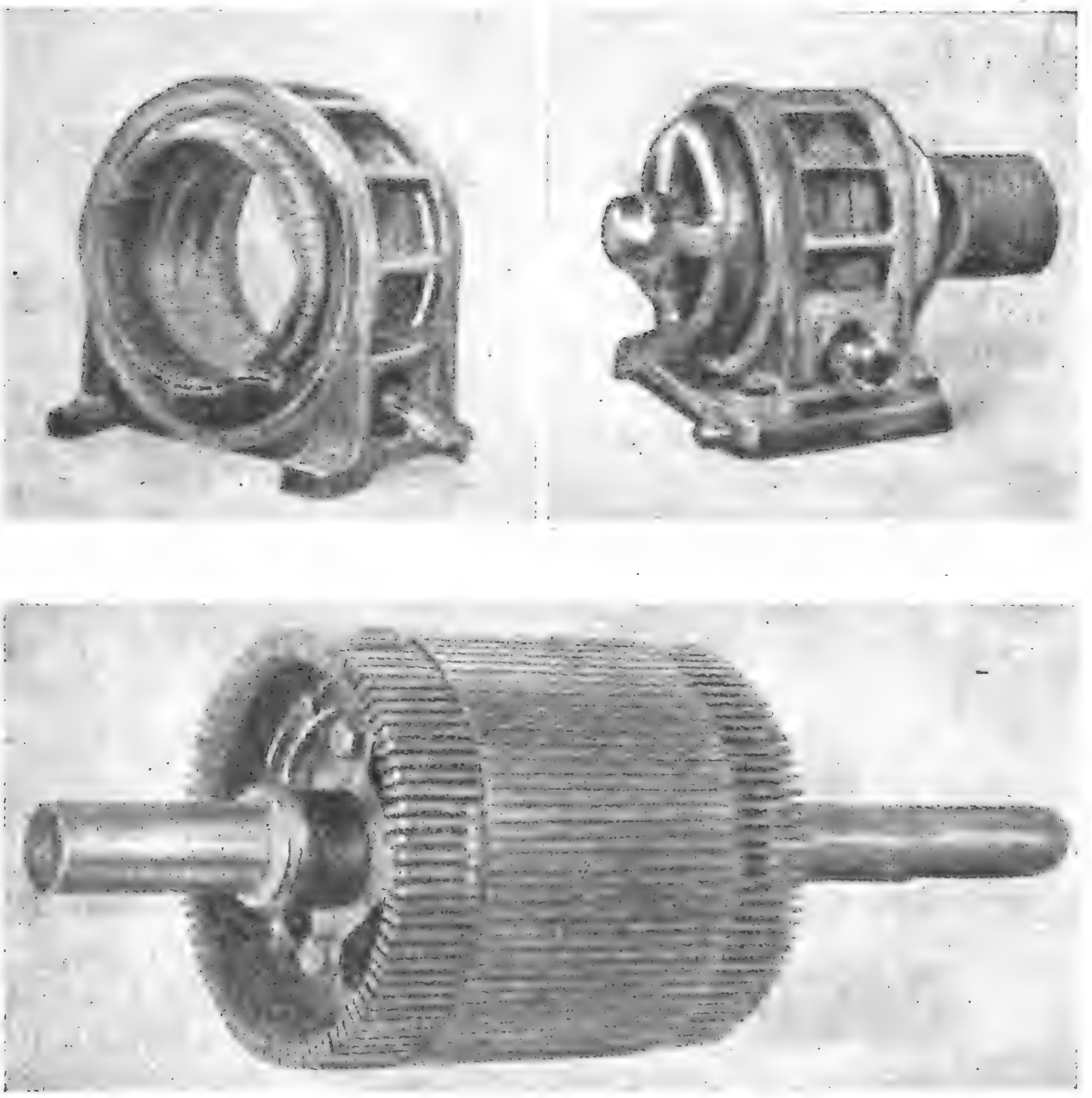
Следует заметить, что первая формулировка правила полностью содержится во второй, потому что при всяком изменении числа силовых линий, охватываемых катушкой, некоторые силовые линии должны пересекаться катушкой, попадая изнутри контура наружу, или наоборот.

350. Основы устройства электрического двигателя (мотора). Прикрепим вертикальный провод *ab* неподвижно к горизонтальному проводу *gh* и укрепим последний на кольце или другой металлической опоре так, как показано на рис. 307, чтобы *ab* мог свободно колебаться, имея *gh* своею осью. Нижний конец провода *ab* опустим в ванночку со ртутью. Если держать магнит в положении, указанном на рисунке, и пропускать через провод ток от сухого элемента, то провод сразу же начнет двигаться в направлении, обозначенном стрелкой *f*, т. е. под прямым углом к направлению магнитных силовых линий. Переменим направление

[1] Если имеется сильный электромагнит, то эти опыты лучше производить не с катушкой, как на рис. 305, а с прямым металлическим стержнем (рис. 306), к концам которого присоединены провода, ведущие к гальванометру. Никакого отклонения не наблюдается, когда стержень движется параллельно магнитным силовым нитям. При движении же сквозь линии стрелка гальванометра сразу же дает отброс.

тока в проводе на противоположное. При этом сила, действующая на провод, также переменит свое направление на обратное.

Мы приходим к заключению, что проводник, по которому проходит ток и который находится в



ИНДУКЦИОННЫЙ МОТОР.

Одним из самых новейших применений закона индукции, открытого Фарадеем, является индукционный мотор. На рисунке показан один из видов этого мотора. В нем нет контакта между неподвижной (статор) и вращающейся частью (ротором). Статор намотан на пластинчатый сердечник, как статор динамы, а ротор состоит из медных стержней, лежащих в пластинчатом сердечнике, причем их концы соединены с медными кольцами, по одному на каждом конце. Таким образом стержни соединены параллельно. Переменный ток, проходя по обмотке статора, порождает магнитное поле, вращающееся вокруг железного кольца статора. Это равносильно ряду магнитных полюсов, вращающихся вокруг ротора. Магнитные линии сил, пересекающие медные стержни ротора генерируют в них электродвижущую силу, заставляющую ток итти в медную систему ротора. Вращающееся поле взаимодействует с полем, вызванным током, проходящим через проводники ротора, — поэтому ротор вращается.

магнитном поле, стремится двигаться под прямым углом как к направлению поля, так и к направлению тока. На этом явлении основано устройство всех электрических моторов.

351. «Правила мотора и динамо». Правило, позволяющее определять в каждом отдельном случае направление, в котором будет двигаться провод *ab* (рис. 307), может быть получено следующим образом: если отдельно изобразить на рис. 308 поле магнита, а на рис. 309 — поле тока, [1] то поле, которое получится, когда проводник с током будет помещен между полюсами магнита, представлено на рис. 310: напряжение результирующего поля над проводом равняется сумме напряжений отдельных полей, а напряжение под проводом — их разности.

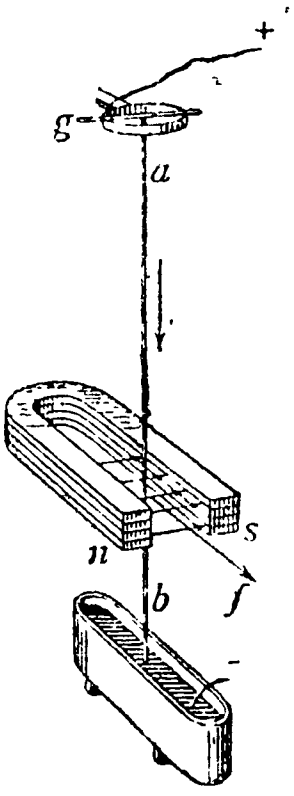


Рис. 307. Основы устройства электрического двигателя (мотора).

Фарадей представлял себе магнитные силовые линии в виде натянутых резиновых тесемок. С этой точки зрения провод на рис. 310 как бы отталкивается вниз. Отсюда получается правило, которое мы назовем правилом мотора:

Проводник с током, находящийся в магнитном поле, стремится двигаться в сторону противоположную той, где силовые линии его собственного поля складываются с силовыми линиями внешнего поля, в котором этот проводник находится.

Другое правило, называемое нами правилом динамо, является непосредственным следствием правила мотора и закона Ленца. Дело в том, что, когда проводник движется в магнитном поле, индуцированный в нем ток должен иметь такое направление, чтобы создаваемое им поле было противоположно тому полю, в котором движение происходит. Следовательно, направление тока индукции должно быть таково, чтобы при этом происходило увеличение числа магнитных сило-

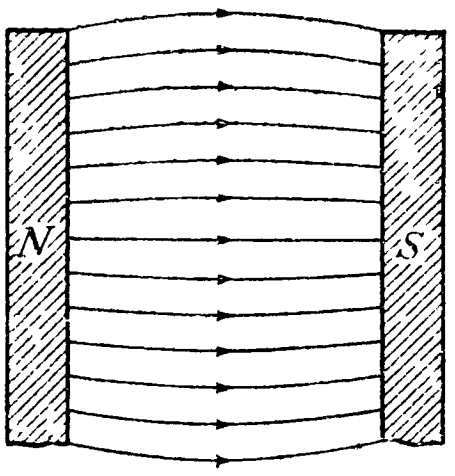


Рис. 308. Поле одного только магнита.

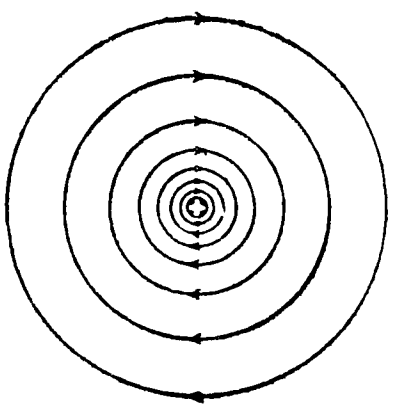


Рис. 309. Поле одного только тока.

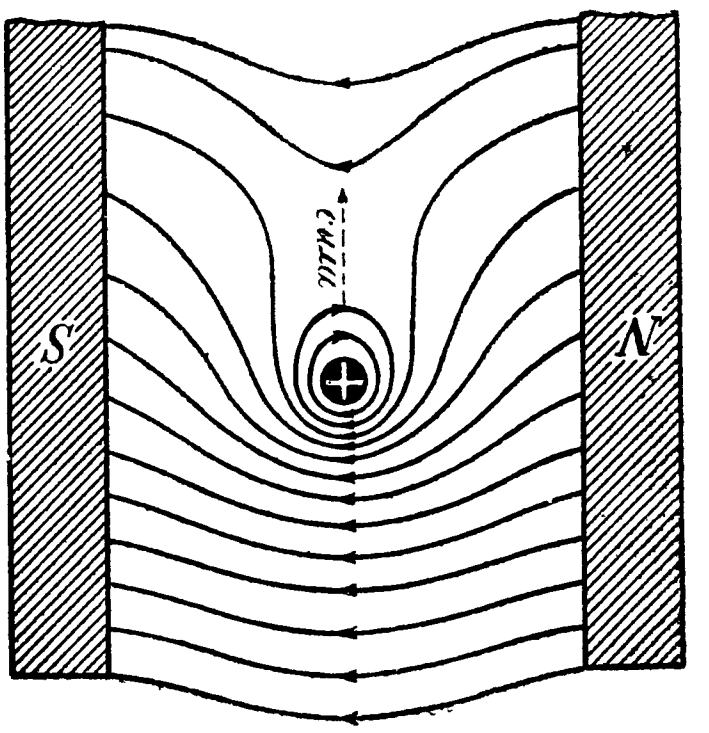


Рис. 310. Поле магнита и тока.

[1] Крестик в сечении проводника на рис. 309, представляющий оперение летящей стрелы, показывает, что ток идет от читателя за плоскость рисунка. Точка, изображающая наконечник стрелы, показывает, что ток идет навстречу читателю из-за плоскости рисунка.

вых линий с той стороны, куда направлено движение.

352. Величина электродвижущей силы индукции. Величина электродвижущей силы индукции зависит только от числа силовых линий, перерезаемых в одну секунду проводником, или, в случае катушки, от скорости изменения числа силовых линий, охватываемых катушкой. Что же касается силы тока индукции, то она определяется отсюда с помощью закона Ома; т. е. она равна частному от деления электродвижущей силы индукции на сопротивление цепи. Число силовых линий, пересекаемых проводником в одну секунду, можно узнать, если известна скорость движения проводника и напряжение магнитного поля, в котором он движется. Необходимо только вспомнить, что (см. § 270) поле, напряжение которого равно единице, содержит одну силовую линию на один квадратный сантиметр, а поле с напряжением в 1000 единиц — 1000 силовых линий на один квадратный сантиметр и т. д. В проводнике, который перерезает силовые линии со скоростью 100 000 000 линий в секунду, возбуждается электродвижущая сила индукции в 1 вольт. [1]

В опыте, описанном в § 347, мы употребляли катушку из 500 витков вместо одного витка по той простой причине, что мы получали таким образом проводник, который пересекал силовые линии магнита 500 раз вместо одного; вследствие этого возбуждаемая электродвижущая сила индукции оказывалась в 500 раз больше, и, следовательно, для данного сопротивления цепи получали ток в 400 раз сильнее.

353. Индукционные токи во вращающихся катушках. Приготовим катушку из 400 или 500 витков медной проволоки № 28 таких размеров, чтобы она могла вращаться между полюсами подковообразного магнита, и соединим ее с клеммами гальванометра так же, как в § 347. Поместив катушку в положение, изображенное на рис. 311 (1), быстро повернем ее в направлении движения часовой стрелки (с точки зрения наблюдателя, который смотрит сверху вниз) на 180°. При этом мы заметим сильное отклонение стрелки гальванометра. Повернем катушку в том же направлении еще на 180°, вернув ее в исходное положение. Мы заметим отклонение стрелки гальванометра в противоположном направлении.

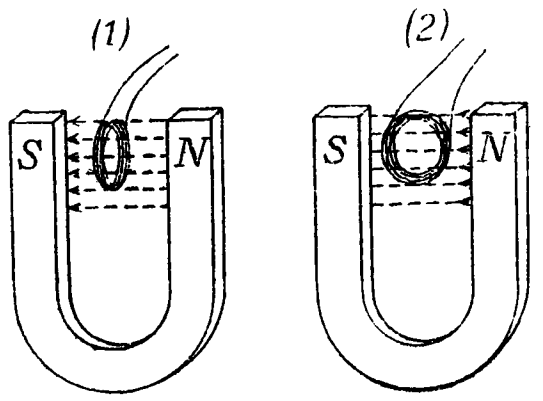


Рис. 311. Направление токов, индуцируемых в катушке, вращающейся в магнитном поле.

Такая установка представляет собой д и н а м о в миниатюре. Во время первого полуоборота (рис. 311, 2) провода с правой стороны петли пересекали силовые линии в одном направлении, а провода слева — перерезали их в противоположном направлении. При этом в правой части катушки возбуждался ток, шедший вниз, а в левой части — шедший вверх (см. «правило динамо»). Легко видеть, что оба тока обтекают катушку в одном и том же направлении. Ток индукции сильнее всего в тот момент, когда катушка находится в положении, изображенном на рис. 311 (2), потому что здесь скорость,

[1] Таково определение вольта, принятое в науке; определение приведенное в § 335, продиктовано удобствами практики.

с которой происходит перерезывание силовых линий, наибольшая. В тот момент, когда катушка занимает или покидает положение, изображенное на рис. 311 (1), ее контур движется п а р а л л е л ь н о силовым линиям; при этом ток ин укции не возбуждается, потому что в этот момент не происходит перерезывания силовых линий. Когда катушка поворачивается дальше еще на 180°, обе стороны ее контура перерезают те же самые силовые линии, что и раньше, но движутся они в обратном направлении; поэтому ток, возбуждаемый во втором полуобороте, также изменился на противоположный тому, который возбуждался в первом полуобороте.

Резюме. **Электродвижущая сила индукции возбуждается в проводнике при пересечении последним магнитных силовых линий.**

Возбуждаемое напряжение пропорционально той скорости, с которой перерезываются магнитные силовые линии.

З а к о н Л е н ц а. Направление электродвижущей силы всегда таково, что создаваемый ею ток производит магнитное поле, которое стремится противодействовать тому движению или какому-либо другому изменению, которое эту электродвижущую силу вызвало.

Проводник с током, находящийся в магнитном поле, стремится двигаться под прямым углом как к направлению поля, так и к направлению тока.

«П р а в и л о м о т о р а». Проводник с током, находящийся в магнитном поле, стремится двигаться в сторону, противоположную той, где силовые линии его собственного магнитного поля складываются с силовыми линиями того поля, в котором этот проводник находится.

«П р а в и л о д и н а м о». Направление электродвижущей силы индукции таково, что она противодействует движению, т. е. она сгущает магнитные линии с той стороны, куда движется проводник.

Вопросы и задачи.

1. Можно ли увеличить или изменить число силовых линий, охватываемых замкнутым контуром, не перерезая силовых линий контуром? Объясните.
2. При каких условиях электрический ток может быть создан магнитом?
3. Приведите закон Ленца и покажите, каким образом он вытекает из начала сохранения энергии?
4. Катушка придвинута к северному полюсу магнита. Направлен ли ток индукции по часовой стрелке или против часовой стрелки, если смотреть на полюс сверху?
5. Если вращать проволочную катушку вокруг вертикальной оси в магнитном поле земли, то в ней возникнет переменный ток. Какое положение занимает катушка, когда ток меняет направление?
6. Какое количество силовых линий в секунду должен перерезывать контур для возбуждения электродвижушей силы индукции в 10 вольт?
7. Корабль с железной мачтой плывет на восток. Каково направление электродвижущей силы, индуцируемой в мачте магнитным полем земли? Если соединить проводом верхушку мачты с ее основанием, то ток по этому контуру не будет проходить. Объясните, почему.
8. Ток идет по вертикальному проводу сверху вниз. В каком направлении будет стремиться провод двигаться благодаря действию магнитного поля земли?

ДИНАМОМАШИНЫ.

354. Простая динамомашина переменного тока. Простейший тип динамомашины состоит из проволочной катушки, которая может непрерывно вращаться между полюсами мощного электромагнита.

Для того чтобы увеличить до возможных пределов напряжение магнитного поля, катушка наматывается на железный сердечник C. Благодаря этому сильно возрастает общее число магнитных силовых линий, проходящих между полюсами, потому что, как показано на рис. 313, они вместо пути в воздухе предпочитают путь в железном сердечнике.

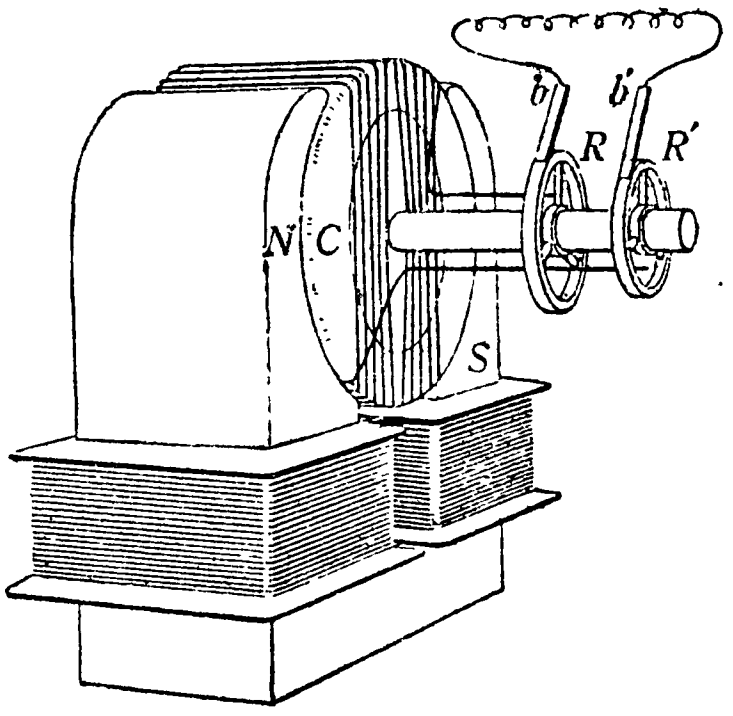


Рис. 312. Якорь с барабанной обмоткой.

Вращающаяся часть, состоящая из обмотки с ее сердечником, называется а р м а т у р о й. Один конец обмотки прикреплен к изолированному металлическому кольцу R, которое неподвижно соединено с валом арматуры и, следовательно, вращается вместе с нею; другой конец обмотки прикреплен ко второму кольцу R'. Щетки b и b', образующие зажимы внешней цепи, все время находятся в контакте с этими концами.

Если заставить обмотку вращаться, то по цепи пройдет переменный индукционный ток. Этот ток меняет свое направление всякий раз, когда обмотка проходит через положение, представленное на рис. 313, т. е. когда проводники в обмотке движутся п а р а л л е л ь н о силовым линиям; при этом те проводники, которые двигались вверх, начинают в этот момент двигаться вниз, а те, которые двигались вниз, начинают двигаться вверх. Сила тока достигает своего наибольшего (максимального) значения, когда обмотка повернется еще на 90°, потому что тогда силовые линии будут с наибольшей скоростью перерезываться проводниками с обеих сторон обмотки. Описанные явления изображены графически кривой электродвижущих сил (рис. 314).

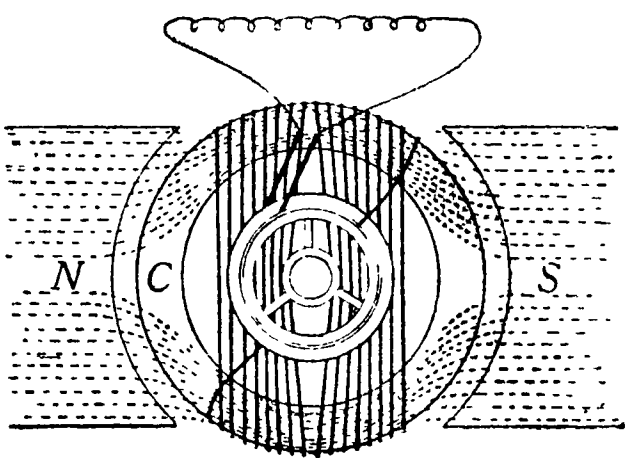


Рис. 313. Боковой вид якоря с барабанной обмоткой.

355. Многополюсный альтернатор. Для практических целей в большинстве случаев желательно иметь 120 или более перемен тока в секунду. Этого

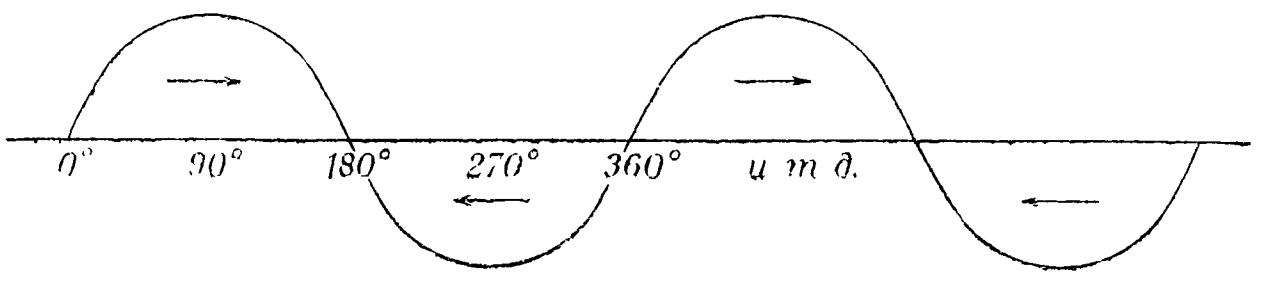


Рис. 314. Кривая переменной электродвижущей силы.

не легко было бы достигнуть с помощью двухполюсных машин, схематически представленных на рис. 312 и 313. Поэтому динамомашины переменного тока обычно строятся с большим числом чередующихся северных и южных полюсов, расположенных по окружности так, как показано на рис. 315. Пунктирные линии показывают направление силовых линий в железе. Легко видеть, что в тех частях обмотки, которые проходят перед северными полю-

сами, направление индукционных токов противоположно направлению токов, возбуждаемых в тех проводниках, которые проходят перед южными полюсами. Однако благодаря тому, что направление обмотки в арматуре меняется между каждыми двумя полюсами, в обмотке все индукционные токи складываются и в каждый данный момент времени образуют один общий ток, который проходит по всей цепи в направлении, обозначенном на схеме стрелками. Этот ток меняет свое направление в тот момент, когда все секции обмотки проходят точки, лежащие посередине между северными и южными полюсами. Число перемен в секунду равно числу полюсов, умноженному на число оборотов в секунду. Половина числа перемен составляет число циклов. Рис. 314 изображает четыре перемены или два цикла. Число циклов в секунду называется частотой. Магниты, создающие поле в такой динамомашине, обычно возбуждаются постоянным током. Альтернаторы мощностью в 5000 киловатт (почти 7000 HP) совершают около 3600 оборотов в минуту. Также весьма распространен альтернаторы, вращающиеся с меньшей скоростью, но обладающие значительно более высокой мощностью. (См стр. 119).

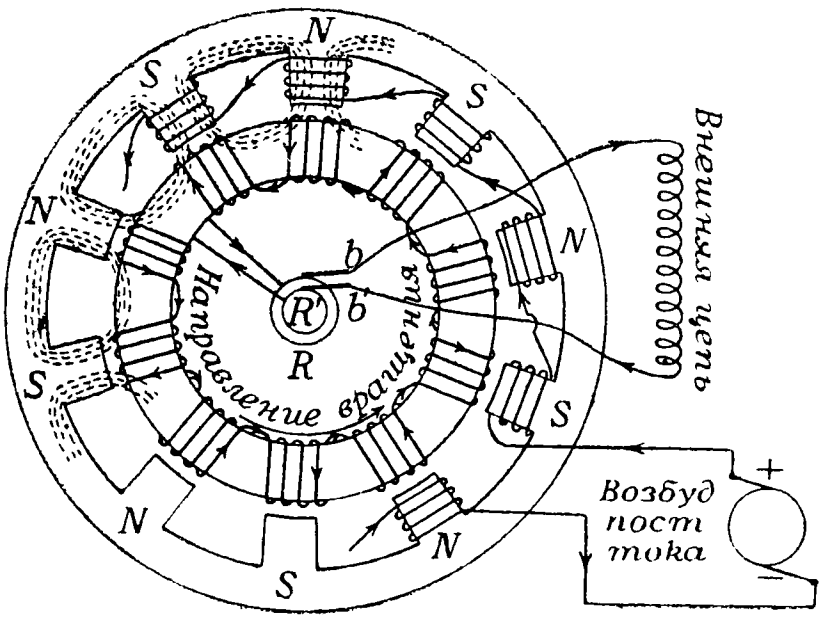


Рис. 315. Схема динамомашины переменного тока.

356. Коммутатор. С помощью так называемого коммутатора оказывается возможным превращать ток, меняющий свое направление в обмотке арматуры, в ток, который проходит во внешних участках цепи только в одном направлении. Простейший вид такого коммутатора представлен на рис. 316. Он состоит из металлического кольца, разрезанного на два одинаковых, изолированных друг от друга, круговых сегмента *a* и *c*. Один конец вращающейся обмотки припаян к одному из этих сегментов, а второй конец — к другому. Щетки *b* и *b'* устанавливаются в таком положении, чтобы они переставали находиться в контакте с одним из сегментов и вступали в контакт с другим сегментом в тот самый момент, когда ток меняет свое направление в арматуре. Следовательно, ток всегда проходит во внешнюю цепь через одну щетку. Хотя ток от такой катушки и коммутатора, какие изображены на рисунке, и будет всегда течь через внешнюю цепь в одном направлении, однако он будет пульсирующим, потому что во время одного полного оборота арматуры он дважды будет достигать максимума, а потом падать до нуля. Это явление в обычных динамомашинах устраняется устройством коммутатора с большим числом сегментов вместо двух; каждый из этих сегментов соединяется с отдельной частью арматуры,

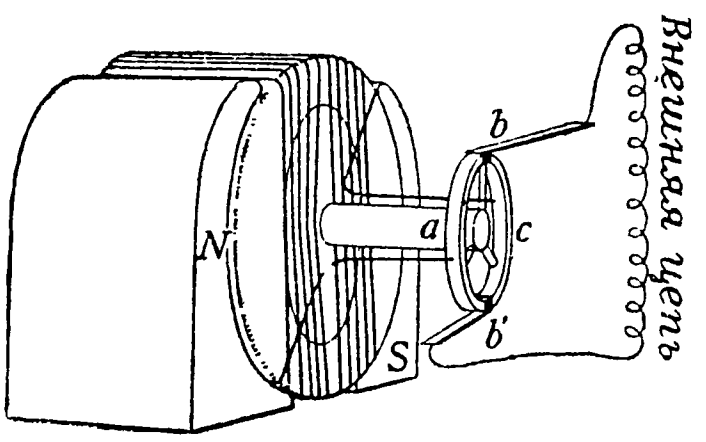


Рис. 316. Простой коммутатор.

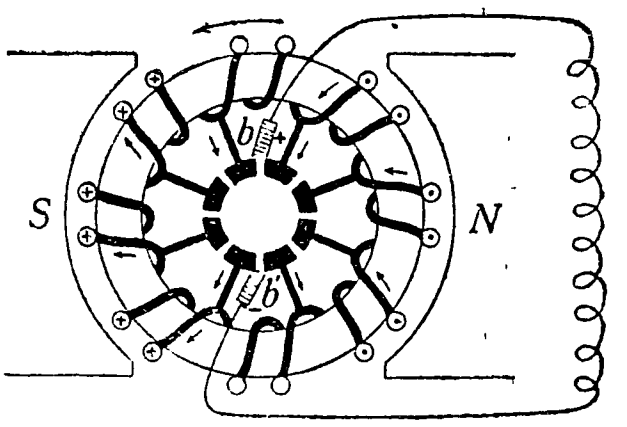


Рис. 317. Двухполюсная динамомашина постоянного тока с якорем с кольцевой обмоткой.

как указано на рис. 317. Кривая тока, получаемого при употреблении коммутатора, состоящего из двух сегментов, изображена на рис. 318.

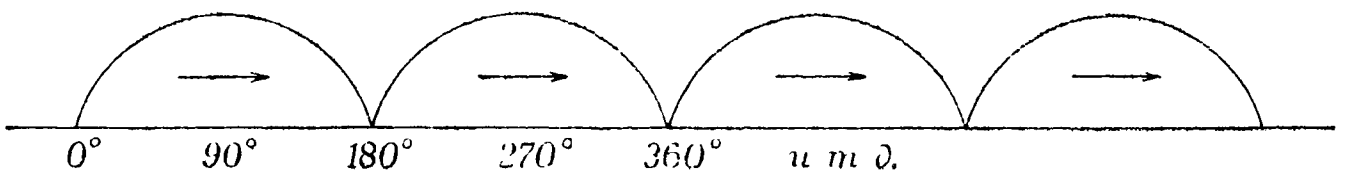


Рис. 318. Кривая электродвижущей силы после коммутации.

357. Динамомашина постоянного тока с барабанной обмоткой. Рис. 319 представляет собой схему устройства двухполюсной динамомашины постоянного тока с обмоткой барабанного типа. В каждый данный момент в левой части арматуры индуцируются токи одного направленія. Крестик на каждом из проводов, изображающий оперенье летящей стрелы, показывает, что при вращении арматуры против часовой стрелки эти токи идут в направлении от читателя за плоскость рисунка. В проводах вверху и внизу никакой электродвижущей силы индукции не появляется, потому что движение здесь параллельно магнитным силовым линиям. С другой стороны, справа от кольца все индуцированные токи имеют обратное направление, т. е. направлены к читателю, потому что здесь все части обмотки движутся не вниз, а вверх. Точка, поставленная в центре каждого про-

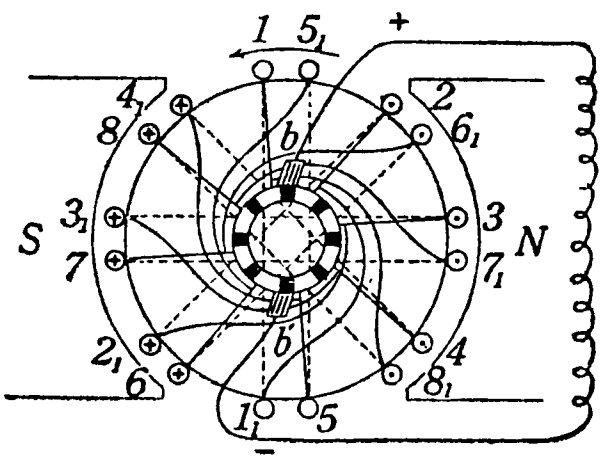


Рис. 319. Динамомашина постоянного тока: барабанная обмотка.

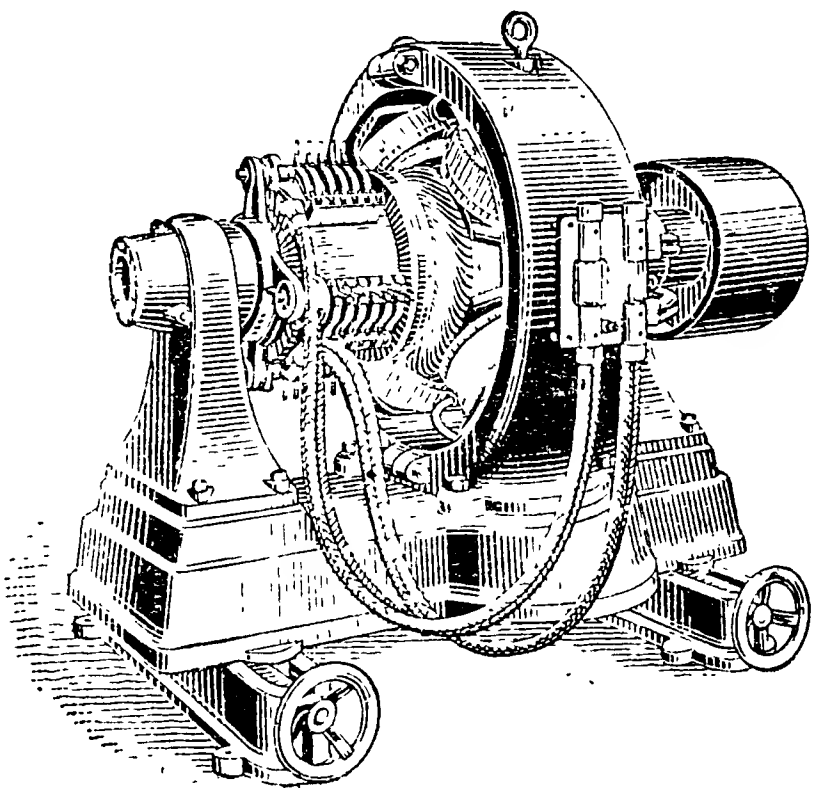


Рис. 320. Четырехполюсный генератор постоянного тока.

вода, изображает острие стрелы, летящей навстречу читателю. Начертив на рис. 319 соединительные линии 1, 1_1, 2, 2_1, 3, 3_1, и т. д. (пунктирными линиями изображены соединения на задней торцовой плоскости барабана), легко, однако, видеть, что благодаря принятому здесь расположению обмотки на поверхности барабана токи в обеих частях всегда текут по направлению к одной щетке b, откуда они поступают во внешнюю цепь и обратно в щетку b'. Так происходит всегда при любой скорости вращения; действительно, как не трудно убедиться, каждая петля обмотки, попадая при вращении в положение, когда происходит перемена направления тока, одновременно проходит под щеткой и, следовательно, сразу же становится частью цепи в другой половине барабана, где все токи идут в противоположном направлении. Рис. 320 изображает типичный современный четырехполюсный генератор, а на рис. 322 представлена более отчетливо обмотка барабанного типа. Рис. 330 (стр. 335) изображает способ намотки такой арматуры; каждая секция обмотки начинается здесь на одном сегменте коммутатора и кончается на прилежащем к нему сегменте.

358. Динамомашина для осветительной цепи. Для целей электрического освещения применяется обычно установка, изображенная на рис. 321. Лампы включаются в магистраль параллельно. Для возбуждения магнитов, создающих поле, служат частью несколько витков проволоки, соединенных

последовательно, через которые проходит весь питающий лампы ток, а частью — обмотка, состоящая из большого числа витков тонкой проволоки (рис. 321) и присоединяемая в виде шунта. Такая комбинация обмоток, соединенных последовательно и параллельно, поддерживает во внешней цепи весьма постоянное напряжение (разность потенциалов) в довольно широком интервале нагрузок .Такая машина называется динамомашиной с обмоткой компаунд в отличие, например, от машины с последовательным возбуждением.

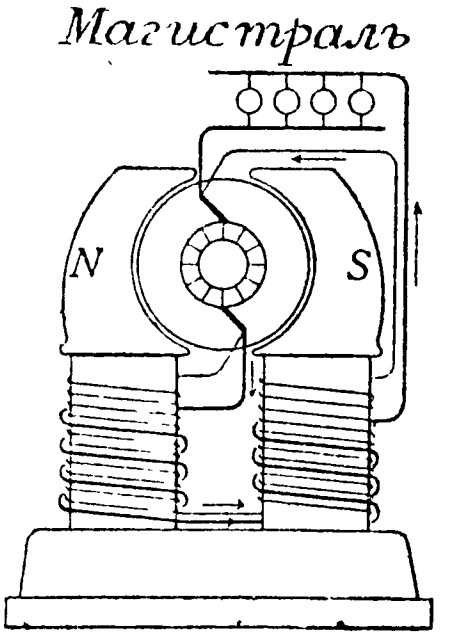
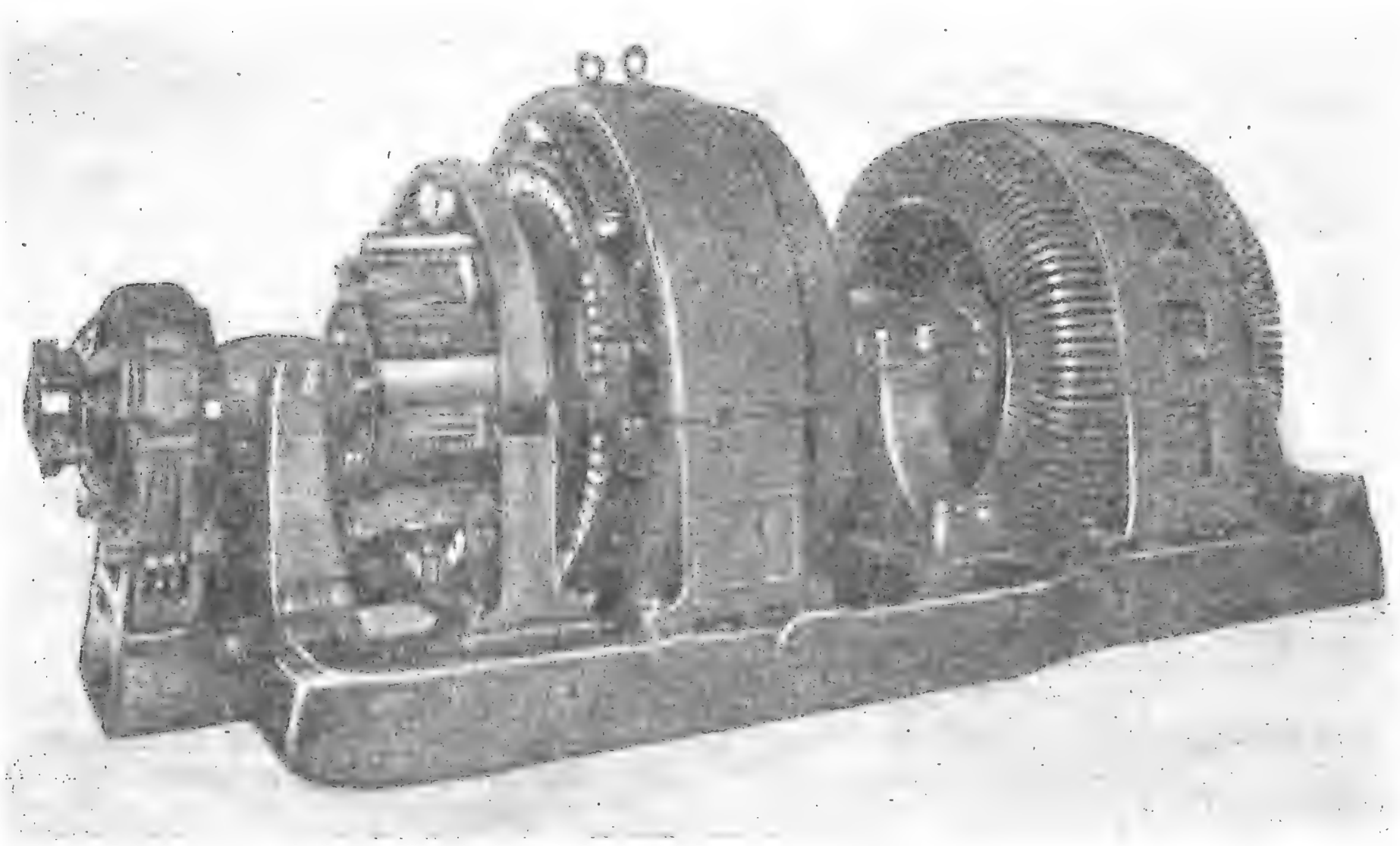


Рис. 321. Динамо-машина с обмоткой компаунд.

Во всех самовозбуждающихся динамомашинах после остановки имеется в железных сердечниках достаточно сильный остаточный магнетизм, для того чтобы при пуске машины создать слабые токи индукции. Эти токи сразу же усиливают напряжение магнитного поля, и таким образом магниты, создающие поле, быстро доводятся до состояния насыщения (см. стр. 243 вид небольшой установки для освещения).

359. Электрический мотор. Устройство электрического мотора не отличается существенно от устройства динамомашины. Для того чтобы познакомиться с работой динамомашины, изображенной на рис. 317, в качестве мотора, предположим, что ток от какого-нибудь внешнего источника проходит сначала через обмотку возбуждения, а затем через щетку b' в арматуру. Здесь он развет-



ГЕНЕРАТОР.

Этот генератор состоит из мотора переменного тока (на правом конце), работающего при 2300 или 4000 вольт. Он движет 8-полюсный генератор (в центре), с которым он связан непосредственно. Генератор дает постоянный ток при 600 в. Поле его возбуждается постоянным током от 4-полюсного 125-вольтового возбудителя, смонтированного на левом конце вала. Генераторы, похожие на этот, употребляются для получения тока для электрической лопаты (см. § 131).

вится и пойдет по всем проводам слева от кольца в одном направлении, а по всем проводам в правой части — в противоположном направлении. Отсюда следует, что в согласии с «правилом мотора» все проводники на левой стороне вынуждены будут двигаться под влиянием поля вверх, а части обмотки справа — вниз.

Следовательно, якорь (арматура) начнет вращаться по направлению часовой стрелки, и это вращение будет продолжаться до тех пор, пока ток будет входить через щетку b' и выходить через щетку b; действительно, в тот момент, когда секции обмотки попадают на одну из щеток b или b', направление проходящего через них тока меняется, а следовательно меняется и направление действующей на обмотку силы. Поэтому правая сторона всегда вынуждена двигаться вниз, а левая вверх. Чем больше сила тока, тем больше и величина силы, вызывающей вращение.

Явление не меняется сколько-нибудь значительным образом, если мы имеем дело с арматурой барабанного типа (рис. 319); дело в том, что, как легко убедиться, проследив за обмоткой, ток, вступающий через щетку b', пройдет через все провода левой части — в одном направлении, а через провода правой части — в противоположном направлении (на листе против стр. 315 изображен и описан так наз. индукционный двигатель).

Электрический мотор представляет собой устройство, которое получает электрическую энергию и превращает ее в механическую энергию. В динамомашине механическая энергия от паровой машины, водяного колеса или какого-либо другого источника превращается в электрическую энергию.

360. Трамвайные двигатели. Вагоны городского электрического трамвая почти всегда приводятся в движение с помощью моторов постоянного тока с последовательным возбуждением, помещаемых под вагонами и посредством зубчатой передачи соединяемых с осями колес. На рис. 322 изображен типичный четырехполюсный трамвайный мотор. Когда мотор открывается для осмотра, как показано на рисунке, то вместе с кожухом поднимаются два верхних полюса возбуждения. Ток обычно вырабатывается динамомашинами с обмоткой компаунд, поддерживающими постоянное напряжение в 500 вольт между воздушным проводом и уложенным под рельсом обратным проводом. Вагоны включены всегда параллельно, как показано на рис. 323. В редких случаях трамвайные вагоны работают на переменном

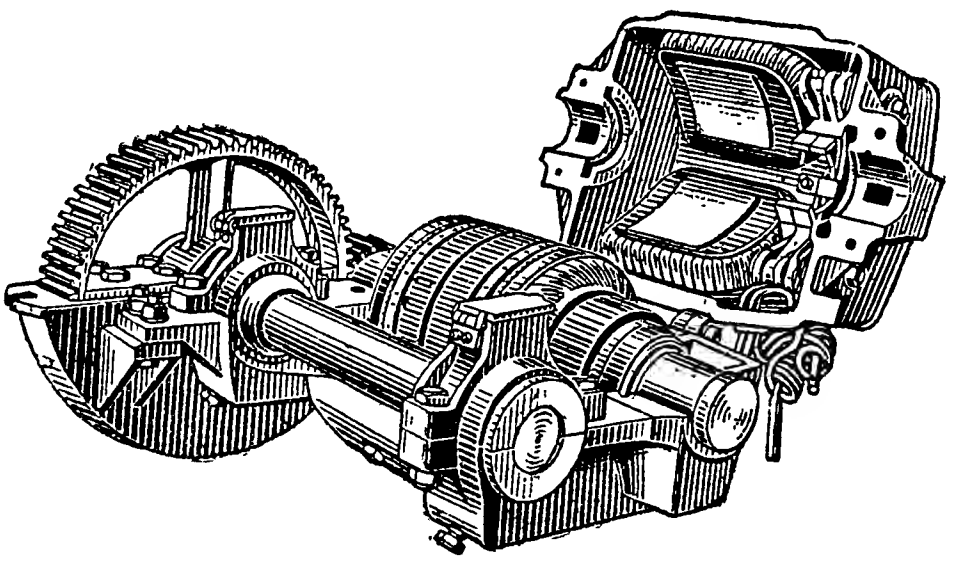


Рис. 322. Трамвайный мотор с поднятой обмоткой возбуждения.

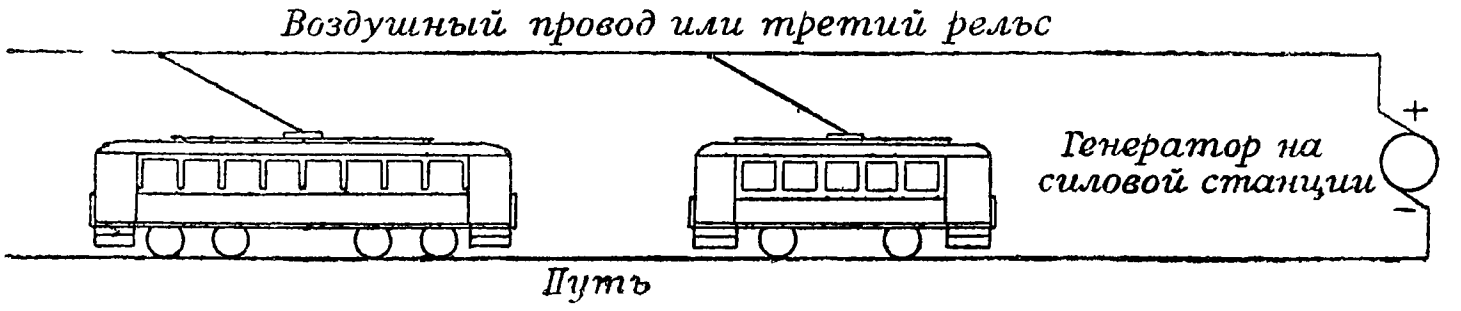


Рис. 323. Схема трамвайной цепи.

токе вместо постоянного. Употребляемые при этом двигатели почти ничем не отличаются от моторов постоянного тока с последовательной обмоткой; так как в таком двигателе ток должен менять свое направление в обмотке возбуждения в тот же момент, когда он меняет направление в арматуре, легко видеть, что арматура (якорь) всегда вынуждена вращаться в одном и том же направлении независимо от того, употребляется для ее питания постоянный ток или переменный. Другие типы двигателей переменного тока мало пригодны для пуска в ход при полной нагрузке, с чем приходится всегда иметь дело в трамвайных моторах.

361. Обратная электродвижущая сила в двигателях. Соедините параллельно от четырех до шести 100-ваттных ламп и соедините такую группу последовательно с мотором, положим, в 1/10 лошадиной силы (для этой цели может служить обычная 75-ваттная демонстрационная школьная динамомашина, если включить ее в качестве мотора). Включите мотор в осветительную сеть. По мере увеличения скорости вращения мотора лампы гаснут. Если замедлить вращение мотора помощью тормозного зажима, то лампы начнут гореть ярче.

Отсюда мы заключаем, что чем больше скорость мотора, тем меньше сила проходящего через него тока. Когда ток от какого-нибудь внешнего источника, проходящий через якорь, приводит его во вращение, обмотка его движется в магнитном поле так же, как если бы вращение производилось паровой машиной в случае работающей динамомашины. Благодаря этому в двигателе возникает электродвижущая сила индукции. Другими словами, двигатель работает одновременно и как мотор и как динамомашина. Направление электродвижущей силы индукции, которое можно определить из закона Ленца или пользуясь правилами «динамо» и «мотора», противоположно внешней разности потенциалов, которой создается проходящий через двигатель ток. Чем быстрее вращается мотор, с тем большей скоростью перерезываются магнитные силовые линии, и тем большей величины достигает так называемая о б р а т н а я э л е к т р о д в и ж у щ а я с и л а.

Если бы двигатель не производил никакой работы (работал бы на холостом ходу), то скорость вращения возрастала бы до тех пор, пока обратная электродвижущая сила не уменьшила бы силы тока до той величины, которая достаточна для преодоления трения. Не трудно отсюда убедиться, что чем быстрее вращается мотор, тем меньший ток проходит через его арматуру; дело в том, что этот ток всегда обусловлен р а з н о с т ь ю между разностью потенциалов, приложенной к щеткам (500 вольт в случае трамвайных вагонов с воздушным проводом), и обратной электродвижущей силой. Когда мотор пускается в ход, обратная электродвижущая сила равняется нулю; поэтому, если бы к щеткам были приложены 500 вольт полностью, то через арматуру прошел бы весьма сильный ток, который разрушил бы арматуру, нагрев ее до чрезвычайно высокой температуры. Во избежание этого двигатели снабжаются п у с к о в ы м р е о с т а т о м, состоящим из ряда отдельных сопротивлений, которые включаются при пуске последовательно с мотором и постепенно выводятся из цепи, по мере того как увеличивается скорость вращения и возрастает обратная электродвижущая сила. Трамвайные вагоны обычно приводятся в движение двумя моторами, которые при пуске работают, будучи соединены последовательно, так что каждый из них представляет собой для другого часть пускового

сопротивления. После того как вагон приобретает достаточную скорость, моторы начинают работать параллельно. Такой способ оказывается экономичнее применения пускового реостата.

362. Электрический счетчик. Электрический счетчик (рис. 324) представляет собой прибор, отмечающий потребление электрической энергии. В основных своих чертах он является электрическим двигателем, не содержащим железа, благодаря чему сила тока, проходящего через обмотку якоря A, прямо пропорциональна разности потенциалов между проводами магистрали, в то время как ток, питающий домашнюю проводку, проходит через обмотку возбуждения F. Следовательно, сила, действующая между F и A, или вращательный момент, приложенный к якорю A, пропорциональны произведению вольт на амперы, т. е. количеству потребленных ватт. Для уменьшения скорости вращения служит магнитный тормоз, действующий благодаря взаимодействию между магнитами M и током индукции в алюминиевом диске D, который вращается между полюсами магнитов. Следовательно, стрелкам циферблата, соединенным с червячной передачей G, сообщается скорость, пропорциональная количеству потребленных ватт, а общее число оборотов пропорционально общему количеству потребленной энергии, выраженной в ватт-часах. (Предложите учащемуся ознакомиться с его домашним электрическим счетчиком.)

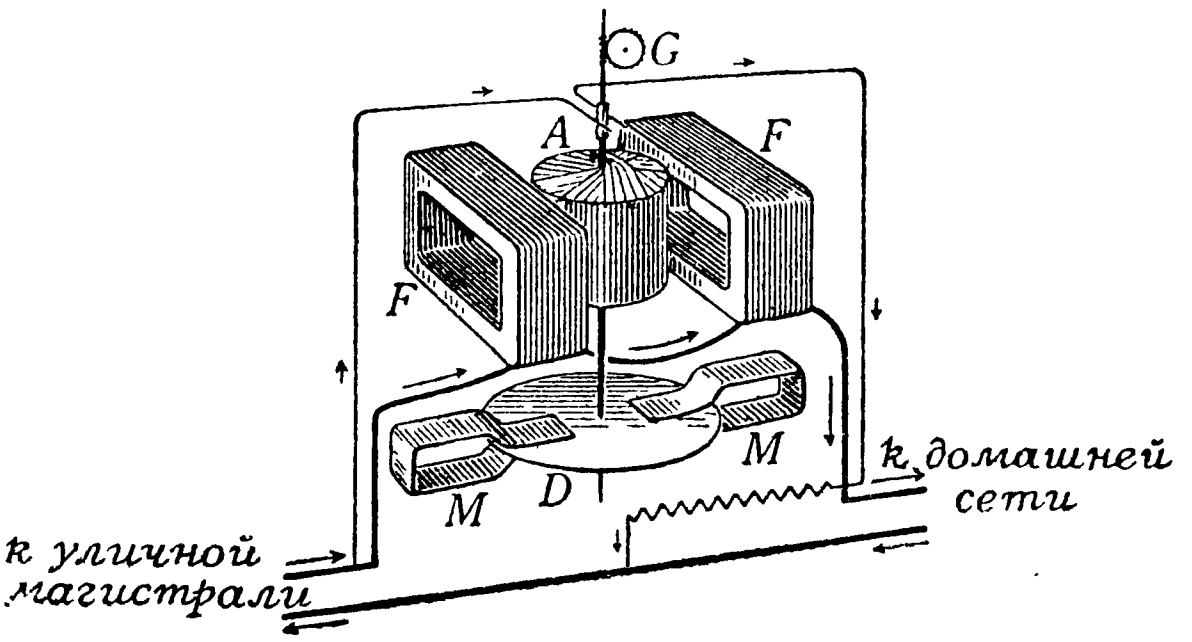


Рис. 324. Внутренний вид электрического счетчика.

Резюме. **В динамомашине возбуждается электродвижущая сила благодаря взаимному пересечению проводников и магнитных силовых линий. Динамомашина превращает механическую энергию в электрическую.**

Электрический двигатель устроен в основных чертах так же, как динамомашина. Он превращает электрическую энергию в механическую работу.

Коммутатор динамомашины служит для того, чтобы из переменного тока в обмотке якоря получать во внешней цепи постоянный ток.

В электрическом двигателе, как это следует по закону Ленца, всегда возбуждается обратная электродвижущая сила.

Электрический счетчик устроен таким образом, что он вращается со скоростью, пропорциональной величине потребляемой мощности (киловаттам). Счетчик можно так проградуировать, чтобы он показывал количество потребляемой энергии (киловатт-часы).

Вопросы и задачи.

1. (1) Из каких главных частей состоит генератор переменного тока? 2) Опишите его действие. 3) Создает ли он электрическую энергию? 4) Объясните ваш ответ.

2. В чем заключается назначение магнитов в динамомашине? Дерево дешевле железа; почему сердечники обмоток возбуждения не делаются из дерева?

3. Придется ли затратить больше работы при вращении якоря динамо с замкнутой цепью, чем с разомкнутой? Почему?

4. Объясните, каким образом переменный ток в арматуре преобразовывается в ток, идущий во внешней цепи по одному направлению.

5. В чем заключается существенное отличие устройства динамомашины постоянного тока от динамомашины переменного тока?

6. Две соседние секции обмотки якоря многополюсного альтернатора пересекают силовые линии, идущие в противоположных направлениях. Каким образом возбуждаемые токи все-таки идут по проводникам обмотки в одном направлении? (Рис. 315).

7. Объясните, как производится пуск в ход электрического двигателя?

8. Как влияет на напряжение динамомашины увеличение скорости вращения якоря? Почему? Как влияет увеличение числа оборотов проволоки в секциях арматуры? Почему? Какое влияние окажет увеличение напряжения магнитного поля? Почему?

9. Когда провод перерезывает магнитные силовые линии со скоростью 100 000 000 силовых линий в секунду, в нем возбуждается электродвижущая сила в один вольт. Обмотка якоря динамомашины состоит из 50 секций по 5 петель в каждой и совершает 600 оборотов в минуту. Каждый провод дважды за один оборот пересекает 2 000 000 силовых линий. Какой величины электродвижущая сила возбуждается при этом?

10. Начертите схему двух проводов, ведущих от генератора, и укажите обычный способ приключения к этим проводам электрических ламп накаливания.

11. Одна динамомашина питает 10 000 ламп накаливания, рассчитанных на напряжение в 110 вольт. Если все эти лампы соединены параллельно и каждая потребляет ток силою в 0,5 ампера, то чему равняется общая сила тока, создаваемого динамомашиной? Чему равняется мощность динамомашины в киловаттах и лошадиных силах?

12. Какое количество 110-вольтовых ламп задачи 11-ой может питать генератор мощностью в 12 000 киловатт?

13. Почему требуется затратить для вращения динамомашины, питающей 1000 ламп, в два раза больше работы, чем когда в цепи имеется 500 ламп?

14. Генератор постоянного тока напряжением в 500 вольт снабжает фабрику током силою в 50 ампер по проводам сопротивлением в 2 ома. 1) Какова мощность, развиваемая генератором? 2) Какого напряжения ток получает фабрика?

15. Для чего служит коммутатор в динамомашине? Каково назначение коммутатора в электрическом двигателе?

16. Объясните, каким образом мотор с последовательной обмоткой одинаково может работать от постоянного и переменного тока.

17. Амперметр, включенный в цепь небольшого мотора, показывает 7 ампер при пуске двигателя в ход и 3,5 ампера, когда мотор вращается с полной скоростью. Объясните причину.

18. Если напряжение, приложенное к зажимам двигателя, равняется 500 вольтам, а обратная электродвижущая сила составляет 450 вольт, то какой силы ток проходит через обмотку якоря, сопротивление которой равно 10 омам?

19. Электрический двигатель развивает 2 *HP* и потребляет ток силою в 16,5 ампер и напряжением в 110 вольт. Найдите коэффициент полезного действия двигателя (1 лошадиная сила = 746 ваттам).

20. Сопротивление проводов, соединяющих генератор с двигателем, равно 0,05 ома; генератор может дать ток силою в 200 ампер. 1) Чему равняется падение потенциала между генератором и двигателем? 2) Сколько ватт затрачивается на передачу тока по проводам?

21. Электрический двигатель, приключенный к сети напряжением в 220 вольт, развивает 3 *HP*; его коэффициент полезного действия равен 85. Какой силы ток проходит через двигатель?

22. Назовите два способа применения и два недостатка механического трения и электрического сопротивления.

ИНДУКЦИОННАЯ КАТУШКА И ТРАНСФОРМАТОР.

363. Токи индукции, появляющиеся при изменении напряжения магнитного поля. Намотайте на один конец железного сердечника около 500 оборотов медной проволоки № 28 (см. рис. 325) и введите в цепь гальванометр G. Затем намотайте еще около 500 витков на другой конец сердечника и соедините с двумя сухими элементами. Отклонение гальванометра при замыкании ключа K показывает, что в катушке s возбуждается мгновенный ток, идущий в одном направлении; такое же отклонение гальванометра, но в противоположную сторону, при размыкании ключа будет свидетельствовать о появлении тока той же самой силы, но идущего в обратном направлении.

Этот опыт является иллюстрацией принципов, положенных в основание устройства индукционной катушки и трансформатора. Катушка p, соединенная с источником тока, называется первичной; катушка s, в которой возбуждаются токи индукции, называется вторичной. Появление силовых линий внутри s (другими словами, намагничивание пространства внутри s) вызывает появление в s индукционного тока; равным образом, размагничивание пространства внутри катушки s также индуцирует в ней ток; это находится в полном согласии с законом, приведенным в § 349 и гласящим, что любое изменение числа магнитных силовых линий, охватываемых контуром, возбуждает в нем индукционный ток. Мы можем предположить, что эти линии всегда существовали в виде замкнутых петель (см. рис. 262 на стр. 222), которые при размагничивании соединяются в двойные линии по оси катушки. При намагничивании одна из этих линий отделяется, перерезывая окружающий проводник, вследствие чего возникает индукционный ток.

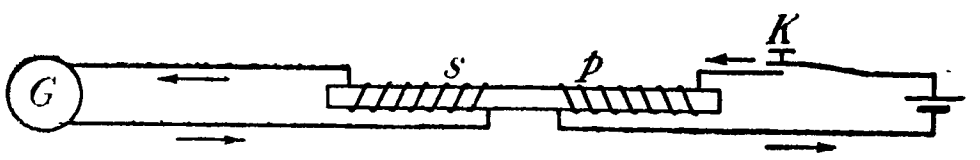


Рис. 325. Индукция тока намагничиванием и размагничиванием железного сердечника.

364. Направление индукционного тока. Закон Ленца, который является следствием начала сохранения энергии, позволяет нам сразу предсказать направление индукционных токов в описанных выше опытах. Наблюдение отклонений гальванометра даст возможность проверить наши предсказания. Рассмотрим сначала случай, когда в первичной цепи появляется ток, вследствие чего сердечник намагничивается. Согласно закону Ленца индукционный ток, возникающий во вторичной цепи, направлен таким образом, чтобы противодействовать изменению, вызванному первичным током, т. е. этот ток стремится намагнитить сердечник в направлении, противоположном тому, в котором его обтекает первичный ток. Мы заключаем отсюда, что при появлении тока в первичной катушке ток, индуцированный во вторичной катушке, имеет направление, противоположное тому, которое он имеет в первичной катушке.

Когда ток в первичной цепи прерывается, то это вызывает уничтожение магнитного поля, созданного первичным током. При этом — как того требует и закон Ленца — направление индукционного тока во вторичной цепи должно быть таково, чтобы он вызвал действие, препятствующее этому процессу размагничивания, т. е. вторичный ток должен намагничивать сердечник в том же самом направлении, в котором он намагничивается исчезающим первичным током. Следовательно, при размыкании первичной цепи ток, индуцируемый во вторичной цепи, имеет то же самое направление, как и ток в первичной цепи.

365. Электродвижущая сила во вторичной цепи. Если бы только половина всей проволоки была расположена в виде витков, то отклонение было бы также ровно в два раза меньше. Так как сопротивление цепи не изменилось, то отсюда мы заключаем, что электродвижущая сила во вторичной цепи пропорциональна числу имеющихся в ней витков проволоки; к тому же самому результату мы пришли в § 352. Следовательно, желая получить во вторичной цепи большую электродвижущую силу, мы должны только сделать ее из достаточно большого числа витков тонкой проволоки.

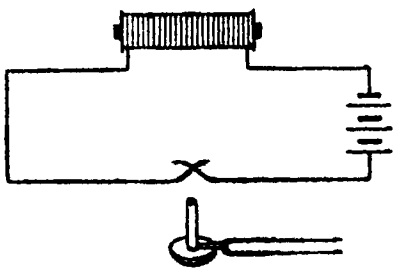


Рис. 326. Искра от самоиндукции.

366. Самоиндукция. Если бы в опыте, изображенном на рис. 325, катушка *s* являлась частью одной и той же цепи *p*, то электродвижущая сила, индуцированная в ней изменениями в магнитном состоянии сердечника, была бы такой же, как указывалось раньше. Другими словами, когда в катушке начинает проходить ток, создаваемое им магнитное поле стремится возбудить индукционный ток, который — в свою очередь — стремится индуцировать ток, противоположный по направлению устанавливающемуся в катушке первичному току, т. е. противодействующий начальному току; при прекращении тока его собственное магнитное поле при своем исчезновении стремится индуцировать ток того же самого направления, как и исчезающий ток, т. е. стремится противодействовать прекращению тока. Таким образом, ток в катушке как бы обладает инерцией, т. е. противодействует всякой попытке изменения его. Указанное свойство катушки называется самоиндукцией.

Поместим несколько сухих элементов в цепь, состоящую из катушки с большим числом проволочных витков, намотанных на железо (рис. 326); цепь замыкается в каком-либо месте двумя соприкасающимися голыми концами медной проволоки. Коснитесь пальцами голого провода и разомкните цепь; вы почувствуете толчок, сообщенный вашему телу током, созданным электродвижущей силой самоиндукции. При разрывании цепи, в которой катушка отсутствует, никакого толчка не получается, хотя сила тока бывает здесь во много раз больше. Разомкните цепь в струе светильного газа; последний при этом воспламенится. На этом основано устройство газового освещения с электрическим зажиганием.

367. Индукционная катушка. Индукционная катушка (рис. 327) обычно состоит из сердечника *C*, изготовляемого из мягкого железа и представляющего собой связку железных проволок; первичная ка-

тушка p намотана вокруг этого сердечника и состоит, приблизительно, из 200 витков толстой медной проволоки (например, № 16), включаемой в цепь батареи с помощью контакта на конце винта d; вторичная катушка s окружает первичную катушку, как указано на чертеже, и состоит обычно из 30 000 — 1 000 000 витков медной проволоки № 36, концы которой выводятся наружу и присоединяются к шарикам искрового промежутка t—t'; кроме того, имеется молоточек b или какое-нибудь другое приспособление, действующее автоматически и служащее для замыкания и разрывания первичной цепи (см. описание системы зажигания § 243).

Отведем пальцем молоточек b в сторону и затем, приведя его на мгновение в соприкосновение с контактом, снова отведем молоточек в бок. При этом оказывается, что в момент разрывания цепи между точками t и t' проскакивает искра; в момент замыкания искры не получается. Объясняется это тем, что, как было выяснено раньше, при замыкании самоиндукция первичной катушки противодействует установлению в ней тока, таким образом, магнитное поле вокруг первичной катушки устанавливается не мгновенно, и его силовые линии входят во вторичную катушку сравнительно медленно. Наоборот, при быстром разрывании цепи мы можем заставить ток в первичной катушке упасть до нуля в чрезвычайно короткое время, правда, не скорее, чем в 0,00001 секунды. Следовательно, количество силовых линий, перерезывающих вторичную катушку при разрывании цепи, приблизительно в 10 000 раз больше, чем при замыкании, и, следовательно, и электродвижущая сила оказывается больше также почти в 10 000 раз. Обычно в индукционной катушке первичная цепь автоматически замыкается и разрывается в точке b с помощью магнита и пружины r, так же как и в случае электрического звонка. Предложите учащемуся самому разобрать и изучить эту часть катушки. Конденсатор, изображенный на схеме в виде двух рядов параллельных пластин, присоединенных к проводам с обеих сторон искрового промежутка между r и d, не является неотъемлемой составной частью катушки; однако оказывается, что длина искры, проскакивающей между концами t и t' искрового промежутка, значительно возрастает при наличии такого конденсатора. Объясняется это следующими причинами: когда в точке b происходит разрыв цепи, инерция (т. е. самоиндукция) первичного тока стремится заставить искру пройти между d и b; если искра действительно здесь проскочила, то ток продолжает проходить через эту искру (или дугу) до тех пор, пока оба контакта не отойдут друг от друга на значительное расстояние. Благодаря этому ток ослабевает постепенно, а не мгновенно, вследствие чего не получается большой электродвижущей силы во вторичной катушке; при наличии конденсатора, в тот момент, когда b отходит от d, ток начинает проходить через конденсатор; молоточек успевает отодвинуться от d на такое расстояние, когда дуга уже не может больше образоваться. Цепь разрывается мгновенно, благодаря чему достигается высокое напряжение во вторичной цепи. Так как искра проскакивает между t и t' только при

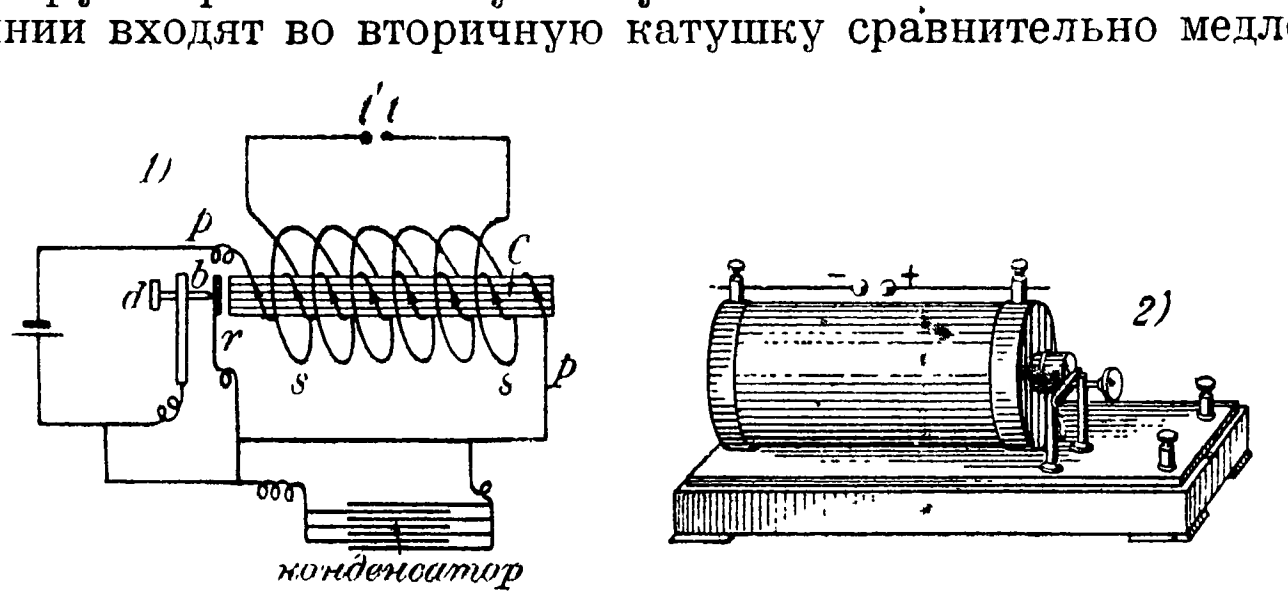


Рис. 327. Индукционная катушка.

размыкании, она должна проходить всегда в одном и том же направлении. Часто устраиваются катушки, которые дают искру в 60 *см*, соответствующую напряжению около 500 000 вольт. В таких катушках общая длина проволоки во вторичной обмотке достигает нескольких сотен километров.

368. Слоистые сердечники; токи Фуко. Сердечник индукционной катушки всегда должен представлять собою пучок проволок из мягкого железа, изолированных друг от друга с помощью шеллака и какого-либо другого изолирующего вещества (см. рис. 328); дело в том, что как в тот момент, когда в первичной катушке с железным сердечником (рис. 329) ток устанавливается, так и в тот момент, когда он исчезает, изменение в магнитном поле первичной катушки индуцирует ток в сердечнике *C*, обладающем проводимостью. Этот ток обтекает сердечник в том же самом направлении, как и индукционный ток во вторичной катушке, т. е. в направлении, обозначенном стрелками. Единственное проявление этих так называемых п а р а з и т н ы х токов, или токов Ф у к о, заключается в производимом ими нагревании сердечника, вызывающем потери энергии. Если бы нам удалось избежать появления этих токов, то вся энергия, затрачиваемая ими на нагревание сердечника, могла бы произвести полезный эффект в виде увеличения силы тока во вторичной цепи. Поэтому сердечник устраивается из изолированных железных проволок, которые располагаются параллельно оси катушки, т. е., другими словами, перпендикулярно тому направлению, в котором возбуждаются индукционные токи. При таком устройстве электродвижущая сила индукции не находит замкнутых путей для образования тока (рис. 328). По той же самой причине железные сердечники в якорях динамомашин и электрических двигателей устраиваются не из одного цельного куска, а из железных дисков, сложенных вместе, как показано на рис. 330, и изолированных друг от друга пленкой окиси. Такого рода сердечник называется с л о и с т ы м. Во всех таких сердечниках зазоры или промежутки между слоями должны быть расположены под прямыми углами к направлению индуцированной электродвижущей силы, т. е. перпендикулярно к проводам, размещенным вокруг сердечника.

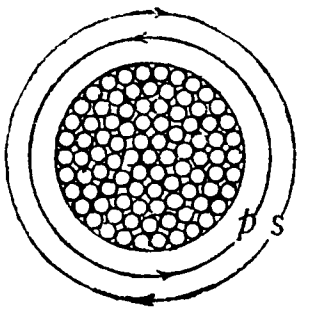


Рис. 328. Сердечник из изолированной железной проволоки.

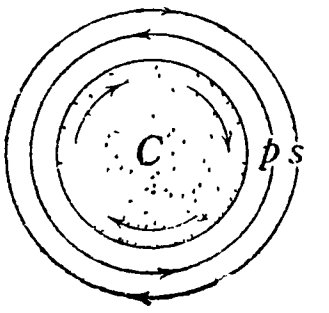


Рис. 329. Схема, изображающая паразитные токи в сплошном сердечнике.

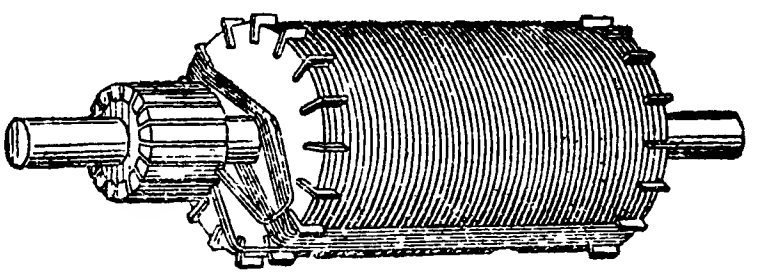


Рис. 330. Пластинчатый сердечник с барабанной обмоткой и с коммутатором: на рис. представлена одна секция, намотанная на сердечник.

369. Трансформатор. Главное отличие индукционной катушки от трансформатора состоит в том, что в последнем сердечник *R* (рис. 331) имеет не прямолинейную форму, а изгибается в виде кольца, или ему придается какая-либо другая форма с той целью, чтобы магнитные силовые линии весь свой путь проходили в железе, не выходя в воздух, как в индукционной катушке. Далее в трансф рматорах первичная обмотка *A* всегда питается переменным током, а не током постоянного направления. При этом сердечник намагничивается сначала в одном направлении, затем размагничивается, снова намагничивается, но уже в противоположном направлении, и т. д. Результатом этих изменений маг-

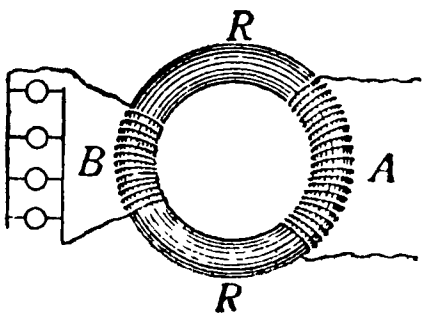


Рис. 331. Схема трансформатора.

нитного состояния сердечника является, конечно, индукционный переменный ток во вторичной обмотке B.

370. Применение трансформатора. Трансформатор употребляется во всех тех случаях, когда требуется превратить переменный ток одного напряжения в переменный же ток другого напряжения, которое по каким-либо соображениям оказывается более удобным. Например, ток напряжением в 1 100 или 2 200 вольт, который обычно вырабатывается динамомашинами, оказывается непригодным для целей электрического освещения, так как нельзя вводить в жилые помещения столь высокое напряжение. Поэтому к магистрали приключаются трансформаторы, как показано на рис. 332. Таким образом ток, который проходит по проводам домашней осветительной сети и питает лампы, не является током, непосредственно получаемым от динамомашины. Он представляет собой индукционный ток, созданный в трансформаторе.

Далее, для приведения в действие электрических звонков напряжение тока в домашней осветительной сети снова понижается с помощью небольших трансформаторов.

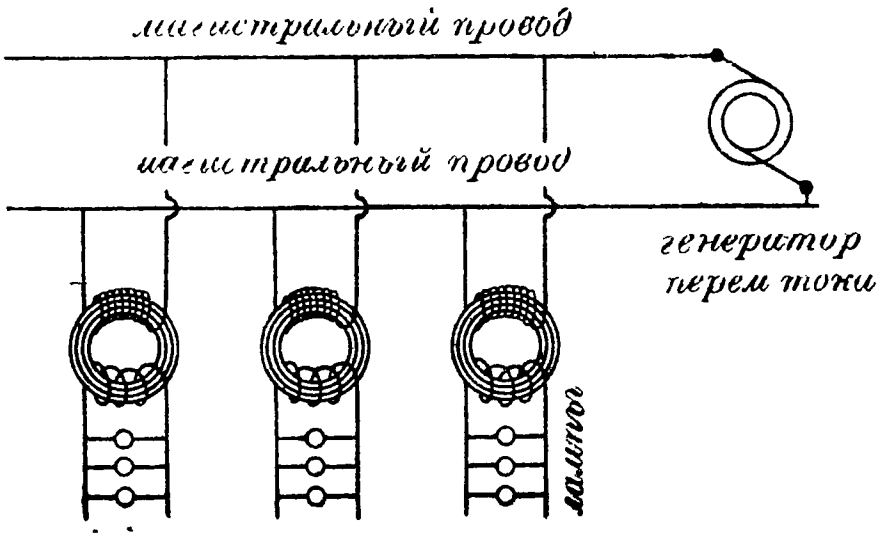


Рис. 332. Осветительная сеть переменного тока с трансформаторами.

371. Напряжение в первичной и во вторичной цепи. В том случае, когда первичная цепь содержит небольшое число витков, а вторичная — много витков, трансформатор называется повышающим, потому что разность потенциалов на зажимах вторичной цепи больше разности потенциалов, приложенной к зажимам первичной цепи. Трансформаторы, употребляемые для осветительных целей, принадлежат большей частью к типу понижающих, т. е. к зажимам первичной цепи прикладывается высокое напряжение (например, 2 200 вольт); у зажимов вторичной цепи получают небольшую разность потенциалов (например, 110 вольт). В таком трансформаторе в первичной обмотке будет в двадцать раз больше витков, чем во вторичной. Вообще, отношение напряжений на зажимах первичной и вторичной цепи выражается отношением числа витков соответственно в первичной и во вторичной обмотке.

372. Коэффициент полезного действия трансформатора. В идеальном трансформаторе коэффициент полезного действия был бы равен единице. Это значит, что электрическая мощность, или число ватт, сообщенное первичной цепи (т. е. произведение числа вольт, приложенных к ее зажимам, на число протекающих через нее ампер), была бы в точности равна мощности или числу ватт, развиваемых во вторичной цепи (т. е. произведению числа вольт, создаваемых на ее зажимах, на силу индукционного тока); и, действительно, в обычных трансформаторах последнее произведение составляет часто 97% пер-

вого (т. е. потеря энергии при трансформировании меньше 3%). Потерянная энергия затрачивается на нагревание трансформатора. Подобного рода передача в больших трансформаторах огромных количеств энергии из одной цепи в другую, совершенно независимую от нее, цепь, происходящая в больших трансформаторах при полном отсутствии какого-либо движения или шума и почти без всяких потерь, представляет собой один из самых замечательных успехов современной техники.

373. Технические трансформаторы. На рис. 333 представлен обычный тип трансформатора, применяемого для осветительных целей. Сердечник

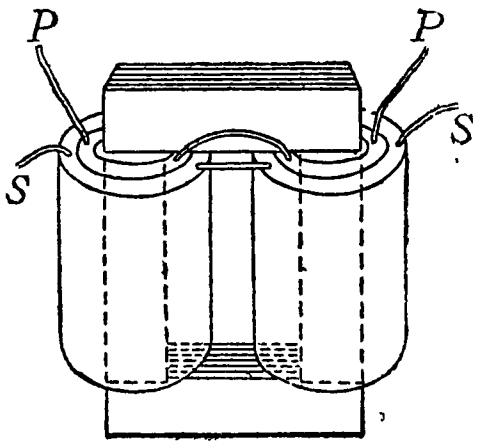


Рис. 333. Трансформатор с сердечником.

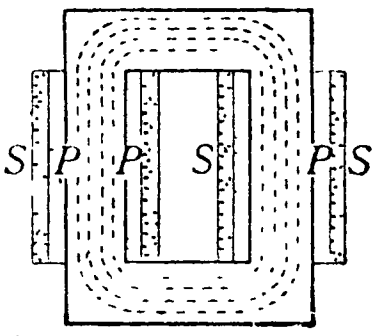


Рис. 334. Поперечное сечение трансформатора, показывающее вид магнитного поля.

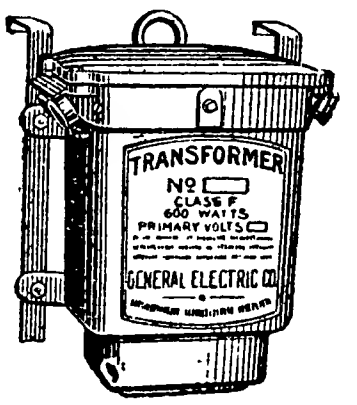


Рис. 335. Трапсформаторный кожух.

состоит из полос листового железа около 0,5 *мм* толщины. На рис. 334 представлен тот же трансформатор в разрезе. Замкнутая магнитная цепь сердечника обозначена пунктирными линиями. Первичная и вторичная цепь обозначены соответственно буквами *P* (primary) и *S* (secondary). Рис. 335 изображает коробку, в которой помещается трансформатор. Такие коробки можно видеть на столбах линий электропередачи, на лестницах, под воротами, в подвалах или на чердаках во всех тех домах, где переменный электрический ток применяется для освещения (рис. 336).

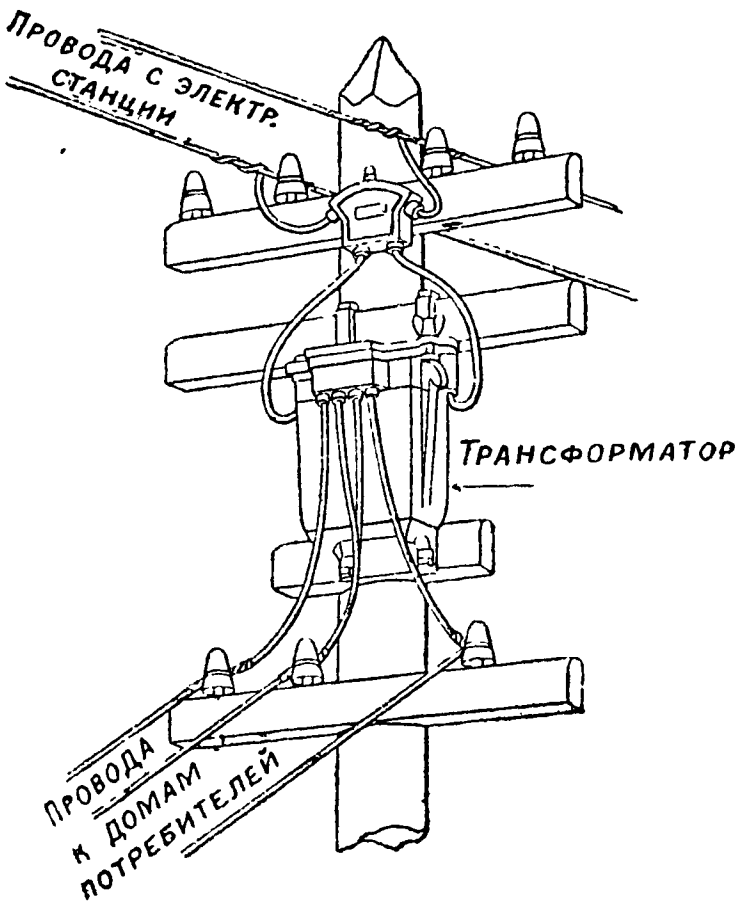


Рис. 336. Трансформатор, установленный на столбе линии передачи.

374. Передача электрической энергии. Так как мощность, развиваемая динамомашиной, выражается произведением электродвижущей силы на силу получаемого тока, то совершенно очевидно, что для передачи из одного места в другое определенного числа ватт, например, 10 000 ватт мы можем иметь ток напряжением в 100 вольт и силою в 1000 ампер или ток напряжением в 1000 вольт и силою в 10 ампер. Однако, потеря энергии в проводах линии передачи будет в обоих случаях различна. Хотя,

$$\text{ватты} = \text{амперы} \times \text{вольты},$$

но, с другой стороны, по закону Ома

$$\text{вольты} = \text{амперы} \times \text{омы};$$

следовательно,

$$\text{ватты} = (\text{амперы})^2 \times \text{омы} = I^2R.$$

Если, следовательно, через R обозначить сопротивление передающих проводов, а через I_v — силу проходящего по ним тока, то количество выделяющейся в них теплоты будет пропорционально I^2R. Отсюда следует, что

количество энергии, потерянной на нагревание проводов линии передачи в случае тока напряжения в 1000 вольт и 10 ампер, составит только 1/100 потерь в том случае, когда передавался бы ток напряжением в 100 вольт и силою в 100 ампер. Таким образом, для передачи энергии на большие расстояния необходимо во избежание больших потерь в проводах употреблять возможно более высокие напряжения.

В виду трудностей, которые встречаются при устройстве изоляции между отдельными сегментами коммутатора, в динамомашинах того типа, которые были описаны раньше, не могут быть получены напряжения выше 1 200 и 1 500 вольт. В альтернаторах вопросы изоляции не приводят к таким затруднениям вследствие отсутствия коммутатора. Большие динамомашины переменного тока мощностью в 87 000 лошадиных сил, установленные на американском берегу Ниагарского водопада, вырабатывают ток напряжением в 12 000 вольт. Это напряжение является для генераторов наивысшим. Во всех тех случаях, когда применяются высокие напряжения, они понижаются в токоприемнике на конце линии передачи до безопасного и необходимого в эксплуатации напряжения (от 50 до 500) с помощью понижающих трансформаторов.

Из того, что было сказано выше, следует, что для передачи электрической энергии на большие расстояния наиболее пригодны переменные токи. Одна электрическая станция в Калифорнии (Big Creek) передает энергию

Рис. 337. Высоковольтная линия передачи на большое расстояние.

на расстояние в 383 километра при напряжении в 200 000 вольт (см рис. § 160). Электрическая компания в Южной Сиерре передает ток через пустыню на расстоянии в 1335 километров. Во всех таких случаях энергия попадает в линию передачи, пройдя сквозь повышающие трансформаторы, расположенные в самом здании станции; понижающие трансформаторы, расположенные у токоприемников, передают энергию электрическим двигателям или лампам, для питания которых она предназначается (рис. 337). (См. о гидроэлектрических станциях, в которых динамомашины приводятся в действие водяными турбинами, рис. § 160 на стр. 119 и 225).

375. Ионный выпрямитель. Опыт показывает, что раскаленная проволочка является источником отрицательных электронов; если к такой проволочке приложено отрицательное напряжение, например, в 25 вольт по отношению к соседнему аноду, то газ, окружающий проволочку, оказывается ионизованным (расщепленным на положительно и отрицательно заряженные части) в результате столкновений электронов с его молекулами. Благодаря этому газ становится проводящим. Эти явления находят применение в ионном выпрямителе переменного тока. Он состоит из баллона (рис. 338), наполненного аргоном при давлении от 3 до 8 *см* ртутного столба. Анод представляет собой небольшой конус из графита или вольфрама, а катод представляет собой вольфрамовую нить, свернутую в виде спирали. Во время действия выпрямителя конус и нить попеременно становятся анодом и катодом, причем в то время как один из них становится анодом, другой — катодом, и наоборот. В тот момент, когда положительным полюсом является конус, а отрицательным — нить, срывающиеся с последней отрицательны

электроны пролетают под действием приложенной разности потенциалов пространство между нитью и конусом, производя ионизацию аргона, который при этом начинает проводить ток, проходящий от конуса к нити. Когда конус становится отрицательным полюсом, а нить — положительным, отрицательные электроны не могут выходить из нити; ионизации газа не происходит и он не становится проводящим. Схема выпрямительной установки представлена на рис. 339.

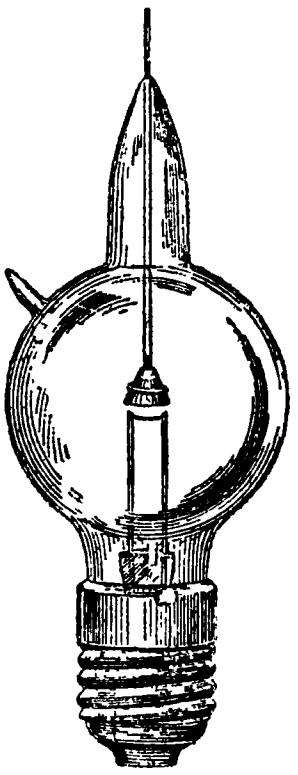


Рис. 338. Ионный выпрямитель.

Выпрямитель присоединяется к сети переменного тока в точках C и D. Переменный ток в первичной обмотке P трансформатора T возбуждает в обмотке S индукционный ток, который служит для накала нити F. A и F служат попеременно положительными и отрицательными полюсами. Когда F — отрицательный полюс, электроны вырываются из нити и ионизируют газ, позволяя току проходить. Когда F становится положительным полюсом, отрицательные электроны удерживаются нитью и не могут производить ионизацию газа, вследствие чего прекращается прохождение тока. Таким образом получается пульсирующий ток, идущий в одном направлении, который может служить для зарядки аккумуляторных батарей или каких-либо других целей. Такой выпрямитель широко применяется для зарядки аккумуляторных батарей в небольших силовых установках и в радиоприемниках. Для получения большей мощности несколько выпрямителей часто соединяются параллельно.

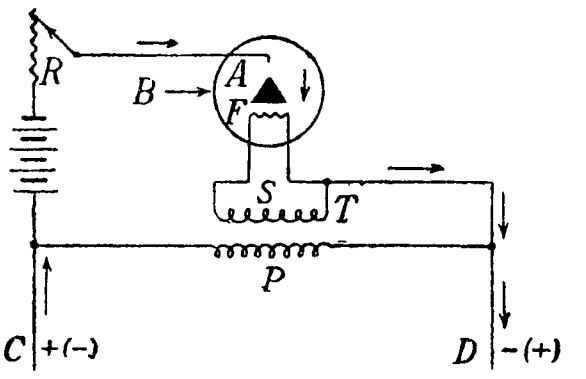


Рис. 339. Основы действия ионного выпрямителя.

376. Основы устройства угольного микрофона. Соедините последовательно сухой элемент, амперметр и два угля от электрической дуги (рис. 340). Прижмите весьма осторожно один уголь к другому и следите за показаниями амперметра. Нажимайте постепенно все сильнее, затем с меньшей силой и все время следите за прибором. Оказывается, что ток возрастает с увеличением давления и падает с его уменьшением.

Это замечательное свойство угля, заключающееся в том, что электрическое сопротивление его меняется вместе с давлением, нашло применение в устройстве угольного передатчика в телефоне. Однако в современном передатчике ток проходит через множество частиц угольного порошка, который, не будучи спрессован, обладает значительным сопротивлением (см. рис. 343).

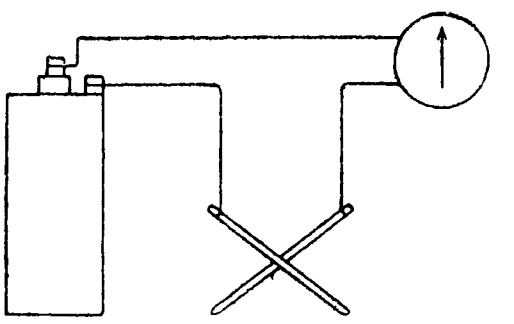


Рис. 340. Основы устройства угольного передатчика.

377. Основы устройства телефона. Телефон был изобретен в 1875 Александром Грехэмом Бэллем из Вашингтона и Элишем Греем из Чикаго.

На рис. 341 изображена схема простейшей телефонной линии с местными батареями.

Ток от батареи B (рис. 341) подводится сначала сзади диафрагмы F, затем проходит через небольшую камеру C, наполненную зернистым углем, к проводящей пластине d передатчика и отсюда через первичную катушку p трансформатора снова обратно в батарею B.

Когда перед рупором микрофона раздается звук, колебания, создаваемые звучащим телом, передаются через воздух диафрагме, за-

ставляя последнюю колебаться взад и вперед. Эти колебания диафрагмы производят изменения в давлении, испытываемом соприкасающимися друг с другом угольными зернами, через которые проходит первичный ток. При этом происходят значительные изменения в сопротивлении первичной цепи; при движении диафрагмы вперед, т. е. к пространству, заполненному углем, через p проходит сравнительно сильный ток, а при обратном движении — значительно более слабый. Эти колебания силы тока, питающего первичную обмотку p, производят соответственные изменения в магнитном поле сердеч-

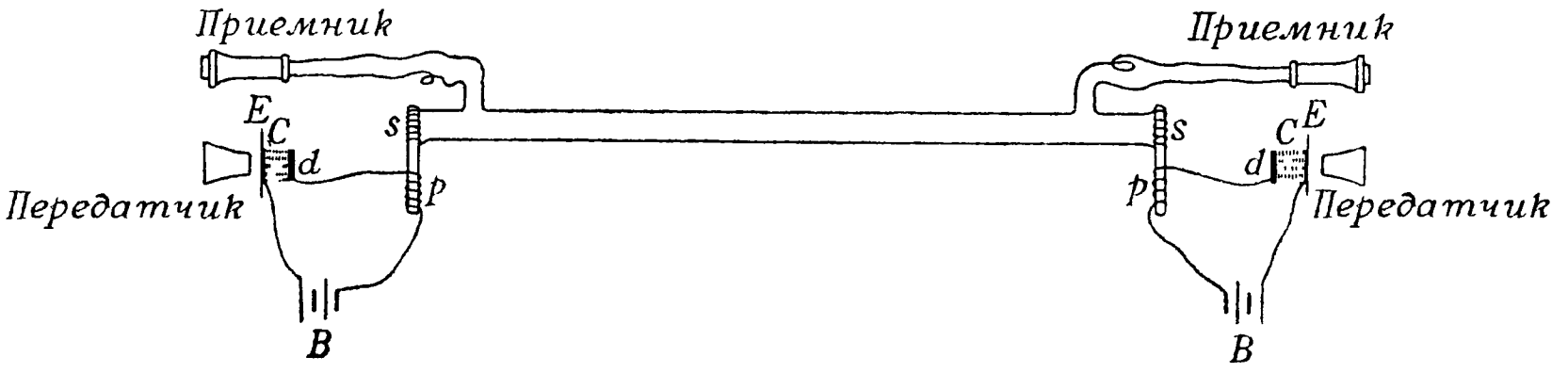


Рис. 341. Телефонная цепь (с местными батареями).

ника трансформатора, который сделан из мягкого железа. Благодаря этому во вторичной обмотке трансформатора s возбуждаются индукционные токи, которые, пройдя линию передачи, попадают в приемник. В виду значительного сопротивления длинной линии употребляется повышающий трансформатор, позволяющий получить достаточно высокое напряжение.

Современный телефонный приемник изображен на рис. 342. Он состоит из постоянного магнита в виде U-образного куска стали, против полюсов которого находится диафрагма из мягкого железа, почти касающаяся концов магнита. На оба полюса намотаны в противоположных направлениях катушки из тонкой изолированной проволоки, последовательно соединенные друг с другом и с линейным проводом. G представляет собой наушник, E — диафрагму, A — U-образный магнит и B — катушки с большим число витков тонкой проволоки и с сердечниками из мягкого железа. Когда быстро меняющийся ток во вторичной катушке s (рис. 341) проходит через катушки приемника, полюсы постоянного магнита при этом попеременно увеличивают и уменьшают силу своего магнетизма, синхронно с звуковыми волнами, падающими на диафрагму передатчика. Изменения в силе притяжения со стороны полюсов, испытываемые диафрагмой приемника, заставляют ее посылать звуковые волны, в точности воспроизводящие те волны, которые падают на диафрагму передатчика.

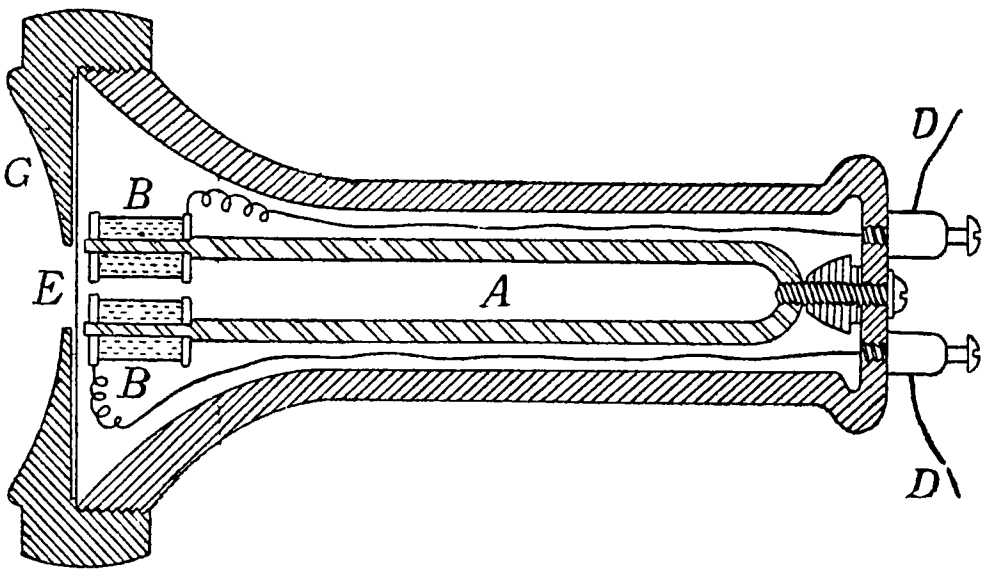


Рис. 342. Современный приемник.

Разговор по телефону может производиться на большие расстоя-

ния так же быстро, как если бы собеседники сидели друг против друга за одним столом. Электрический сигнал проходит по телефонным проводам расстояние между Нью-Йорком и Сан-Франциско приблизительно в одну пятнадцатую секунды. Передача речи на столь большие расстояния оказалась возможной только благодаря особым передатчикам, в которых применяются вакуумные приборы и которые не вносят в разговор искажений. В Соединенных штатах Северной Америки имеется в употреблении 15 000 000 телефонов; общая длина телефонных линий достигает 42 000 000 *км*. Телефонный кабель, соединяющий Нью-Йорк с Чикаго, обошелся в 25 000 000 долларов, длина его равна 1 385 *км*, диаметр—7,5 *см*; он содержит почти 720 000 *км* проволоки. По этому кабелю можно вести сразу 250 телефонных разговоров и одновременно с этим передавать 500 телеграмм. Поперечный разрез передатчика, применяемого для дальних разговоров, изображен на рис. 343. Ток проходит через угольные зерна, удерживаемые между двумя угольными пластинами.

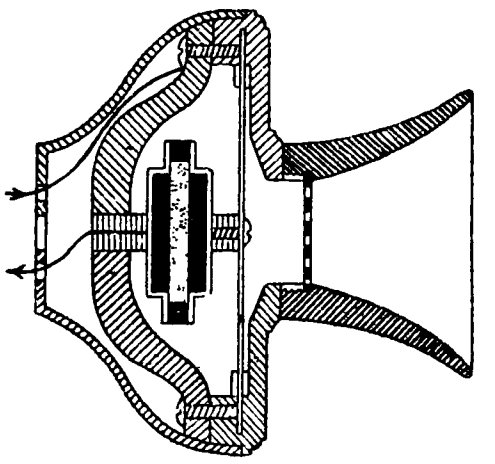


Рис. 343. Поперечное сечение телефонного передатчика на большие расстояния.

Резюме. **При возрастании первичного тока индукционный ток во вторичной цепи идет в направлении, обратном первичному току. При уменьшении силы первичного тока индукционный ток идет в том же направлении, что и первичный.**

Самоиндукция обусловливает появление электродвижущей силы индукции в какой-либо части той же самой цепи, по которой проходит первичный ток; при этом закон Ленца показывает, что ток как бы обладает инерцией.

Для устранения токов Фуко, вызывающих нагревание в трансформаторах и в арматуре динамомашин, применяются слоистые сердечники.

Отношение напряжений в первичной и во вторичной обмотке трансформатора равняется отношению числа соответствующих витков.

Для умепьшения потерь на нагревание проводов при передаче на большие расстояния применяются слабые токи высокого напряжения.

Действие пустотных выпрямителей зависит от испускания электронов раскаленными телами.

Действие микрофона основано на изменении сопротивления угля при изменении давления.

Полюса постоянного магнита в телефонном приемнике испытывают только усиление или ослабление в намагничивании; знаки же их не изменяются.

Вопросы и задачи. [1]

1. Начертите схему индукционной катушки и объясните, как она действует.
2. Объясните, почему индукционная катушка способна создавать столь огромную электродвижущую силу.
3. Начертите схему повышающего трансформатора и обозначьте его важнейшие части.
4. Какое отношение должно существовать между числом витков первичной и вторичной обмотки трансформатора, питающего 110-вольтовые лампы от сети напряжением в 1 100 вольт?
5. Покажите на схеме, каким образом в трансформаторе для дверных электрических звонков осветительный ток напряжением в 104 вольта преобразуется в ток напряжением в 8 вольт, который приводит звонок в действие.

[1] Дополнительные вопросы и задачи к главе XV помещены в приложении.

6. Для понижения напряжения с 220 до 6 вольт имеется трансформатор с 1100 витками в первичной цепи. Сколько витков должно быть во вторичной цепи?

7. Предположите, что требуется передать на большое расстояние 5 000 000 ватт. Будет ли экономичнее воспользоваться для передачи током силою в 50 ампер и напряжением в 100 000 вольт, или силою в 5000 ампер и напряжением в 1000 вольт? Объясните ваш ответ.

8. Ток силою в 3 ампера и напряжением в 1000 вольт пропускается через первичную обмотку трансформатора, у которого коэффициент полезного действия равен 97%. Какое количество 40-ваттных ламп можно будет зажечь, присоединив их ко вторичной обмотке трансформатора?

9. Почему ионный выпрямитель выпрямляет переменный ток?

10. Какое расстояние проходит звук при телефонном разговоре между Нью-Йорком и Сан-Франциско? Что же идет по телефонным проводам?

11. Сделайте на память аккуратный рисунок телефонного передатчика и приемника, включая батарею и соединения, а также объясните действие каждого аппарата.

12. Назовите три современных электрических прибора или машины, которые обязаны своим возникновением открытию Эрстеда, а также три прибора или машины, обязанные своим существованием открытию Фарадея.

ГЛАВА XVI.

ПРИРОДА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА.

СКОРОСТЬ И ПРИРОДА ЗВУКА.

378. Источники звука. Если приделать к звучащему камертону острие, касающееся закопченной стеклянной пластинки, то оно начертит волнообразную линию, как показано на рис. 344; если привести в соприкосновение с

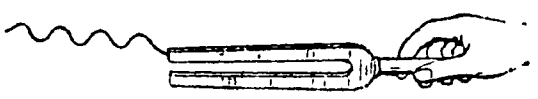


Рис. 344. Траектория, описываемая какой-либо точкой колеблющегося камертона.

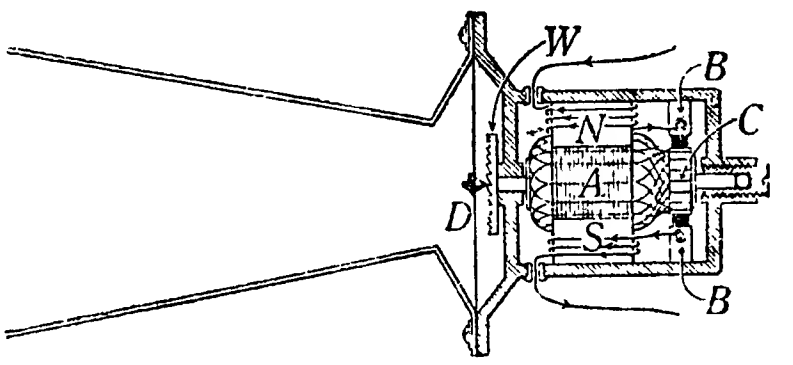


Рис. 345. Автомобильный рожок, приводимый в действие небольшим электрическим двигателем.

острием подвешенный легкий шарик, то последний будет отброшен со значительной силой. Если мы станем искать причину какого-либо внезапно раздавшегося шума, то всегда окажется, что последний вызван падением какого-либо предмета, каким-либо ударом, столкновением или взрывом, одним словом, каким-то перемещением вещества. На рис. 345 изображен один из источников звука — автомобильный гудок. Все эти хорошо известные явления приводят к заключению, что звук происходит от движения вещества.

379. Промежуточная среда. Средой, сквозь которую звук доходит до наших ушей, является обычно воздух; однако индеец, для того чтобы услышать отдаленный шум, прикладывает свое ухо к земле; многие мальчики знают, как громко раздается под водой звук от

удара камней. Если приставить длинную палку одним концом к классной доске, а вилку колеблющегося камертона приложить к другому концу палки, то будет слышен сильный звук, исходящий из доски. Если укрепить основание камертона на деревянной подставке и опустить его в лохань, то окажется, что звук заметным образом передается резонансному ящику (рис. 346). Эти факты свидетельствуют о том, что газ в роде воздуха оказывается нисколько не лучше для передачи звука, чем жидкость или твердое тело. Посмотрим же теперь, необходима ли вообще материя для распространения звука.

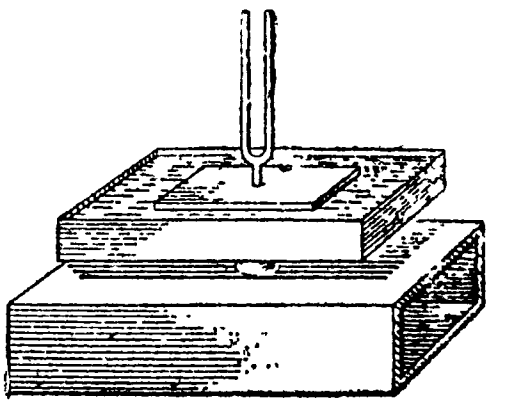


Рис. 346. Передача звука через воду.

Подвесим внутри колокола воздушного насоса электрический звонок с помощью двух тонких пружин, которые проходят через резиновую пробку, как показано на рис. 347. Насосом будем выкачивать из колокола воздух. При этом сила звука будет все время ослабевать. Снова впустим воздух. Сила звука опять сразу возрастет.

Так как по мере приближения к пустоте звук становится все слабее, то мы отсюда заключаем, что звук не может распространяться сквозь пустоту и что, следовательно, р а с п р о с т р а н е н и е з в у к а п р о и с х о д и т т о л ь к о ч е р е з п о с р е д с т в о о б ы к н о в е н н о й м а т е р и и. В этом отношении звук отличается от теплоты и света, которые, очевидно, распространяются сквозь совершенную пустоту, так как они приходят на землю от солнца и отдаленных звезд.

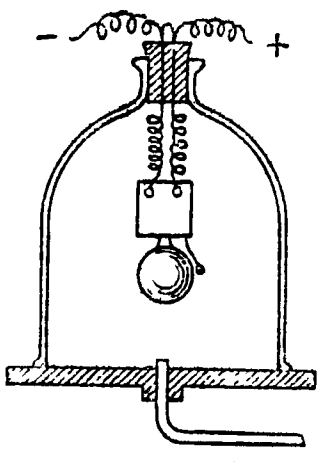


Рис. 347. Звук не распространяется через пустоту.

380. Скорость распространения. Первая попытка точно измерить скорость звука была произведена в 1738 г. комиссией Французской академии наук; наблюдатели, находившиеся на расстоянии приблизительно в 5 *км*, определяли промежуток времени между моментом, когда они замечали вспышку пушечного выстрела, и тем моментом, когда они слышали звук выстрела. Благодаря тому, что наблюдения между двумя станциями производились сначала в одном направлении, а затем в другом, устранялось влияние ветра. Вторая комиссия повторила эти опыты в 1832 г. на расстоянии в 18,6 *км*. Скорость звука была определена в 331,2 *м* в секунду при 0° С. Принятое в настоящее время значение равно 331,3 *м*. Скорость в воде составляет около 1 400 *м* в секунду и в железе — 5 100 *м*.

Наблюдения показали, что скорость звука в воздухе возрастает с поднятием температуры. Увеличение это составляет около 60 *см* в секунду на 1° С. Следовательно, скорость при 20° С равна приблизительно 343,3 *м* в секунду.

381. Механизм распространения. Когда происходит взрыв хлопушки или пистона, порох внезапно превращается в газ, объем которого в огромное число раз больше объема пороха. Поэтому воздух внезапно отбрасывается во все стороны от центра взрыва. Это значит, что частицам воздуха, находившимся вблизи этого центра, сообщены

большие скорости, направленные наружу.[1] Когда частицы воздух , отброшенные с большой силой наружу, сталкиваются с другими частицами, они приводят их в такое же движение и т. д. Ясно, что движение, вызванное взрывом, должно передаваться от частицы к частице на бесконечное расстояние от места взрыва. (См. рис. стр. 291.) Далее, столь же очевидно, что, хотя движение распространяется на большие расстояния, отдельные частицы не должны удаляться из своих первоначальных положений; действительно, легко показать на опыте, что при всяком столкновении движущегося упругого тела с таким же неподвижным телом сталкивающееся тело просто передает свое движение телу, находившемуся в покое, и само становится неподвижным.

Подвесим на шнурках, как показано на рис. 348, шесть или восемь одинаковых стальных шариков. Отведем сначала все шарики — за исключением двух — в сторону и затем, подняв один из оставшихся шариков, отпустим его. При этом оказывается, что после столкновения первый шарик почти совершенно останавливается, между тем как второй шарик поднимается практически почти на ту же самую высоту, с которой первоначально упал первый шарик.

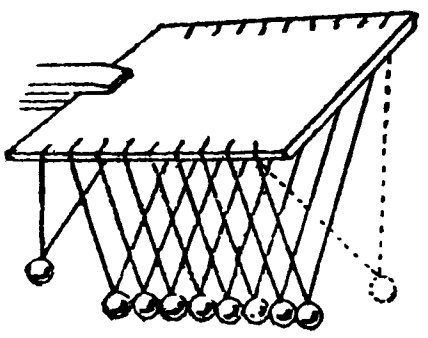


Рис. 348. Иллюстрация распространения звука от частицы к частице.

Предыдущий опыт дает нам очень верную механическую иллюстрацию того, каким образом частицы воздуха, приведенные в движение взрывом хлопушки или колебаниями камертона, передают эти движения во все стороны соседним слоям воздуха, эти, в свою очередь, следующим и т. д., до тех пор пока движение не распространится на весьма далекое расстояние, хотя отдельные частицы сами передвигаются только на очень малые расстояния. Когда такого рода движение, передаваемое частицами воздуха, достигает барабанной перепонки уха, оно производит ощущение, которое мы называем з в у к о м. В физике, однако, словом «звук» обозначается не само ощущение, а только то волновое движение, которое способно вызвать это ощущение.

382. Ряд волн; длина волны. В предыдущих параграфах мы ограничились рассмотрением одного импульса, который зарождается в центре взрыва. Так называемое м а н о м е т р и ч е с к о е п л а м я дает очень простой и красивый способ обнаружения возмущений, которые производит в воздухе непрерывно колеблющееся тело (см. стр. 282).

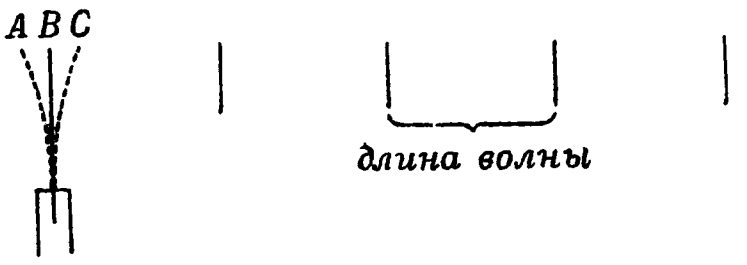


Рис. 349. Колебания, создающие в окружающей среде последовательность равноотстоящих импульсов.

Начнем сначала вращать зеркало. Колебаний пламени никаких не будет и изображение пламени во вращающемся зеркале будет представлять прямую полосу, как показано на рис. 2. Заставим теперь звучать камертон C перед рупором G. Мы увидим в зеркале картину, изображенную на нашем рисунке посере-

[1] Эти скорости, направленные наружу, просто складываются с теми скоростями, которыми эти молекулы уже обладали благодаря тепловому движению. Для наших целей можно совершенно пренебречь существованием этих скоростей и считать частицы находившимися в покое до того момента, когда им были сообщены скорости взрывом.

дине (3). Затем возьмем вместо C другой камертон, производящий двойное число колебаний в секунду, и также заставим его звучать перед рупором. Картина, которая получится в зеркале, представлена на том же рисунке внизу. Расстояние между изображениями пламени уменьшилось вдвое, так как диафрагма испытывает теперь в два раза больше толчков в секунду. [1]

Движения пламени, которые можно было обнаружить с помощью вращающегося зеркала, когда перед рупором G производился какой-нибудь звук, были обусловлены изменениями в давлении питавшего пламя газа. Эти изменения давления, сообщавшиеся газу, поступавшему в камеру B, являются прямым следствием колебаний диафрагмы, которые могли быть созданы только посредством следующих друг за другом в регулярные промежутки времени воздушных толчков.

Рассмотрим толчки, производимые ножкой камертона, на рис. 349. При своем движении вправо ножка производит сотрясение, которое распространяется в воздухе со скоростью 330 *м* в секунду; механизм этого распространения был описан в предыдущих параграфах. Следовательно, если ножка камертона колеблется равномерно, то мы получим непрерывную последовательность сотрясений, следующих в воздухе друг за другом на одинаковых расстояниях. Предположим, например, что ножка камертона совершает в секунду 110 полных колебаний. По истечении одной секунды первое сотрясение (первый импульс) удалится на расстояние 330 *м*. Следовательно, на протяжении 330 *м* будут равномерно распределены 110 импульсов, причем расстояния между ними будут в точности равны другу друг, т. е. расстояние между двумя соседними импульсами составит 3 *м*. Если ножка камертона производит 220 колебаний в секунду, расстояние между двумя соседними импульсами составит только 1,5 *м* и т. д. Расстояние между двумя соседними импульсами в такой последовательности волн называется длиной волны.

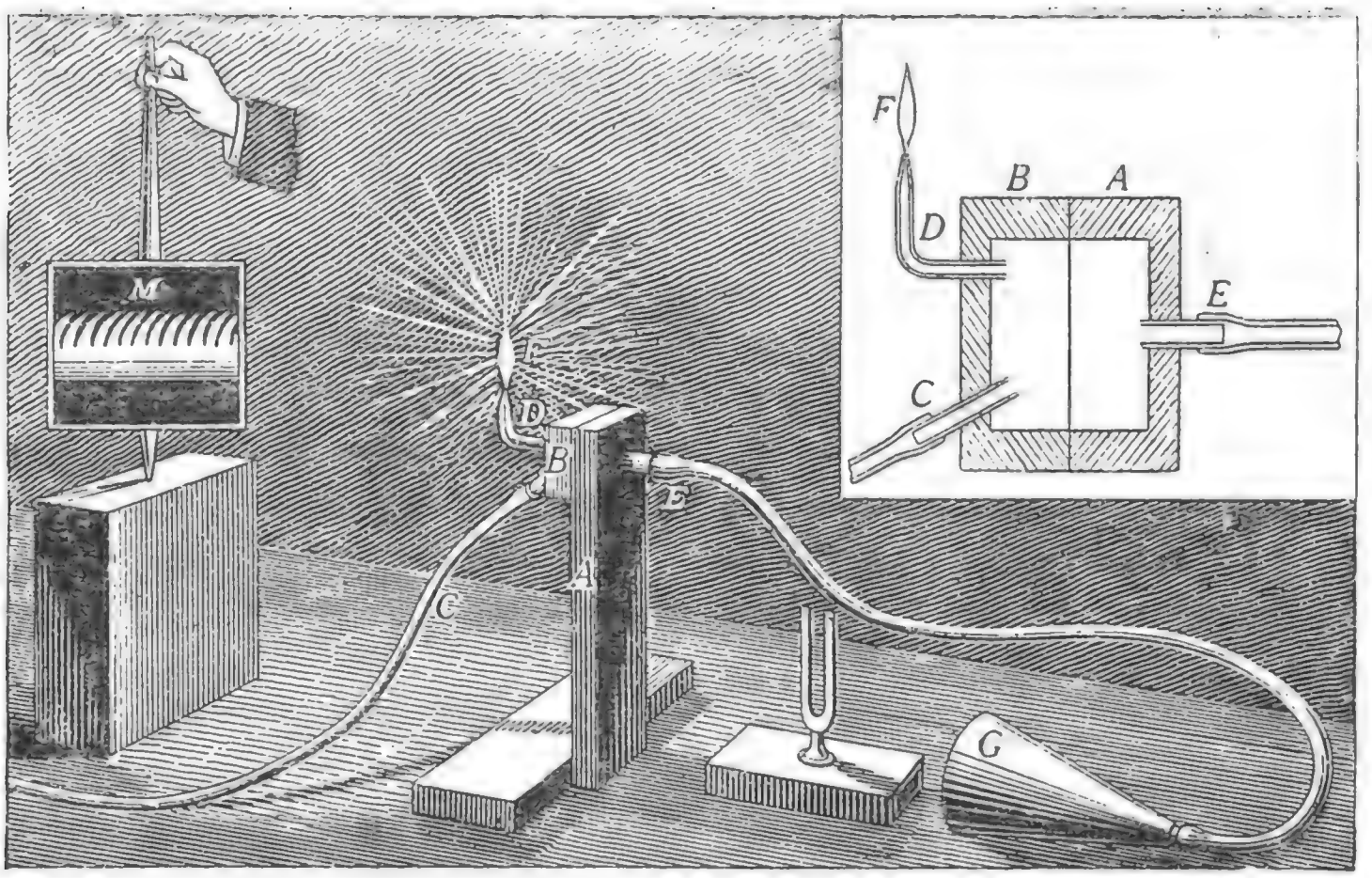
383. Связь между скоростью, длиной волны и числом колебаний в секунду. Если число колебаний, производимых в секунду источником звука, обозначить через n, длину волны — через l и скорость, с которой звук распространяется в данной среде, — через v, то из примера, приведенного в предыдущем параграфе, вытекает следующее соотношение между этими тремя величинами:

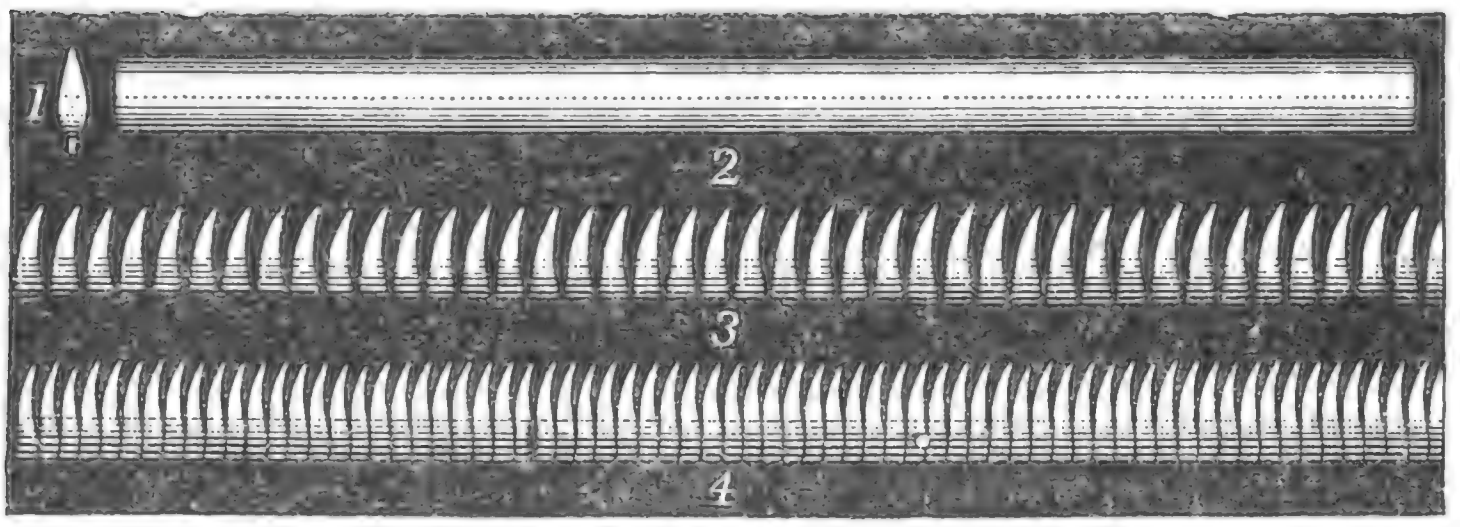
$$l = \frac{v}{n} \quad \text{или} \quad v = nl, \quad \ldots\ldots\ldots (1)$$

т. е. длина волны равняется скорости, деленной на число колебаний в секунду, или скорость равняется числу колебаний в секунду, умноженному на длину волны.

---

[1] Если нет вращающегося зеркала, то можно взять кусок обыкновенного зеркала и, держа его в руках, производить им быстрые колебания взад и вперед вокруг вертикальной оси; таким способом можно получить весьма удовлетворительные результаты





МАНОМЕТРИЧЕСКОЕ ПЛАМЯ.

Этот прибор состоит из следующих частей: камера ***B***, из коей газ по трубкам ***C*** и ***D*** идет к пламени ***F***; вторая камера ***A***, отделенная от первой упругой диафрагмой из тонкой резины или бумаги и сообщающаяся с источником звука через трубку ***E*** и трубу ***G***; вращающееся зеркало ***M***, в которое наблюдают пламя. При постоянной скорости вращения число зубцов на ***см*** дает высоту звука. Качественный анализ звука также производится манометрическим пламенем (см. стр. 301).

384. Сжатия и разрежения. До сих пор мы для простоты рассматривали последовательность волн как ряд слабых отдельных сотрясений (импульсов), разделенных равными промежутками неподвижного воздуха. В действительности же воздух перед ножкой камертона *B* (рис. 349) получает толчок вперед не в какой-либо определенный момент, но в течение всего времени, пока ножка камертона движется из положения *A* в положение *C*, т. е. за время половины одного колебания камертона; и в течение всего этого времени поступательное движение передается все более и более отдаленным от ножки слоям воздуха, так что, когда последняя попадает в положение *C*, весь воздух на расстоянии половины длины волны между *C* и *c*

(рис. 350) стремится двигаться вперед и, следовательно, находится в состоянии сжатия или с г у щ е н и я. Далее, при своем обратном движении из положения *C* в положение *A* ножка камертона стремится оставить позади себя пустоту; для того чтобы ее заполнить, туда устремляется воздух из соседних слоев, следующие слои также приходят в движение и т. д., так что, когда ножка камертона достигает положения *A*, весь воздух между *A* и *c* (рис. 350) движется обратно и, следовательно, находится в состоянии, характеризуемом уменьшением плотности, т. е. в состоянии р а з р е ж е н и я. За

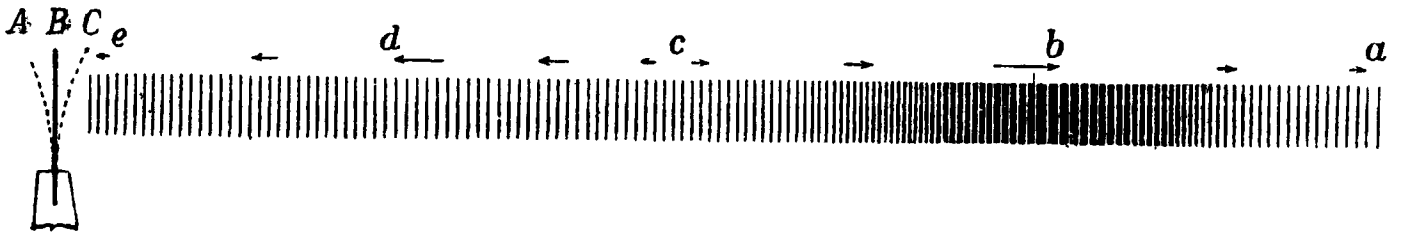


Рис. 350. Иллюстрация движений частиц воздуха в воздушной волне, состоящих из сжатия и разрежения.

это время поступательное движение подвинулось вправо на половину длины волны, так что в этом движении участвует воздух, занимающий пространство между *c* и *a* (рис. 350). Таким образом, по окончании одного полного колебания ножки камертона мы можем разделить весь воздух, находящийся на расстоянии одной длины волны, на две части: на область сжатия *ac* и на область разрежения *ce*. Стрелки на рис. 350 изображают направление и относительную величину скорости движения частиц воздуха в различных частях внутри целой волны.

После того как произошло *n* колебаний, первое возмущение достигло точки, отстоящей от камертона на *n* длин волн; при этом каждая волна между этой точкой и камертоном состоит из сжатия и разрежения; таким образом, можно сказать, что звуковые волны состоят из ряда сгущений и разрежений, следующих в воздухе одно за другим, как показано на рис. 351.

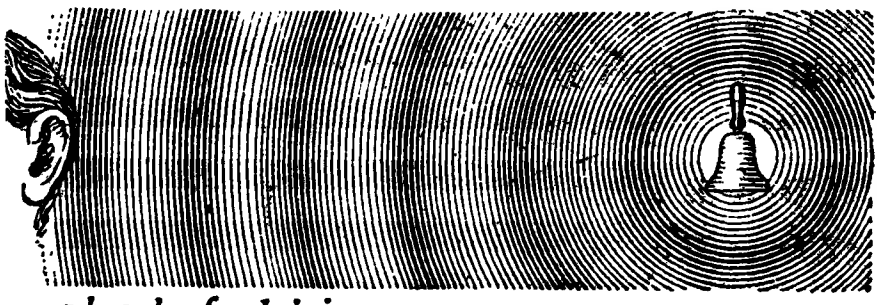


Рис. 351. Изображение звуковых волн.

Мы можем теперь более точно определить длину волны как расстояние между двумя соседними точками, в которых достигается наибольшее сгущение (*b* и *f*, рис. 351) или наибольшее разрежение (*d* и *h*, рис. 351).

385. Сравнение с водяными волнами. Сгущения и разрежения в звуковых волнах являются до некоторой степени подобием хорошо известных нам гребней и впадин водяных волн. Точно так же длина волны в ряде волн, изображенном на рис. 352, определяется как расстояние *bf* между двумя гребнями или расстояние *dh*, или *ae*, или *cg*, или *mn* между двумя точками, в которых возмущение имеет одинаковый характер и которые, как говорят, находятся в одной фазе. Гребни (части, заштрихованные сплошными линиями и лежащие выше уровня воды) в точности соответствуют сгущениям в звуковых

волнах (частям воздуха, где плотность выше обычной). Впадины (части, заштрихованные пунктирными линиями) соответствуют разрежениям в звуковых волнах (частям воздуха, в которых плотность ниже нормальной). Однако это сходство проявляется не во всем; а именно, в водяных волнах колебание частицы имеет поперечный характер, т. е. последние движутся перпендикулярно направлению распространения, между тем как в звуковых волнах, как было показано в § 384, частицы движутся взад и вперед в направлении распространения волн. П о э т о м у в о д я н ы е в о л н ы н а з ы в а ю т с я п о п е р е ч н ы м и в о л н а м и, а з в у к о в ы е в о л н ы в в о з д у х е н а з ы в а ю т с я п р о д о л ь н ы м и в о л н а м и.

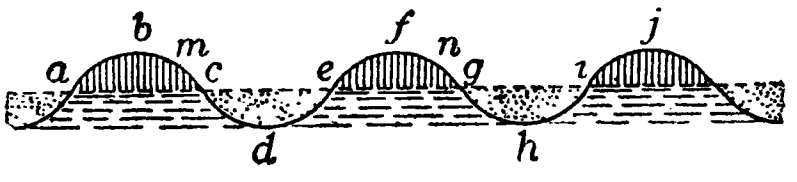


Рис. 352. Длина волны на примере водяных волн.

386. Разница между музыкальными звуками и шумом. Направим воздушную струю из наконечника с отверстием в 3 *мм* в диаметре в отверстия, проделанные в металлическом или картонном диске; общее число отверстий, расположенных на равных расстояниях (в 6 *мм*) по окружности диска, — 48; диск установлен, как показано на рис. 353, и приводится во вращение рукой или электрическим мотором. При этом получается отчетливый музыкальный тон. Затем направим струю воздуха во второй ряд из 48 отверстий которые отличаются от отверстий первого ряда лишь тем, что они расположены по окружности диска не на равных расстояниях, а в беспорядке. Музыкальный характер тона при этом совершенно исчезнет.

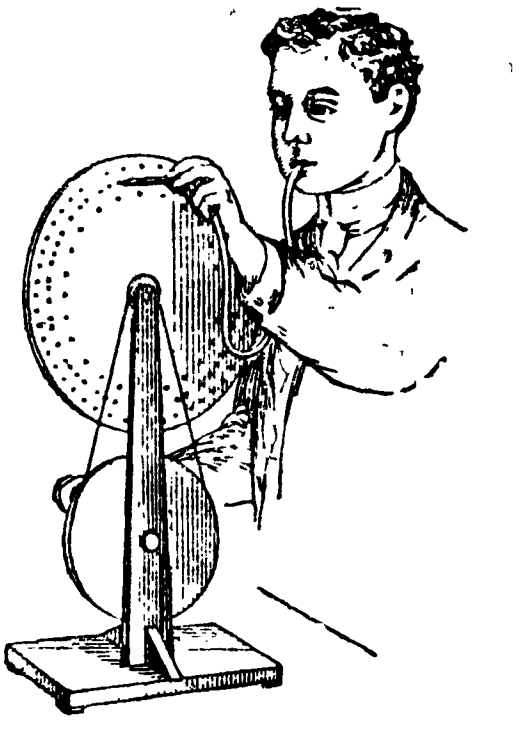


Рис. 353. Правильное чередование импульсов является необходимым условием получения музыкального тона.

Этот опыт служит замечательной иллюстрацией различия между музыкальным звуком и шумом. М у з ы к а л ь н ы м и с в о й с т в а м и о б л а д а ю т т о л ь к о т е з в у к и, к о т о р ы е с о з д а ю т с я и с т о ч н и к о м, с п о с о б н ы м п о с ы л а т ь и м п у л ь с ы и л и в о л н ы ч е р е з с о в е р ш е н н о п р а в и л ь н ы е п р о м е ж у т к и в р е м е н и.

387. Высота тона. Пусть в тот момент, когда в предыдущем опыте диск вращается с некоторой постоянной скоростью, струя воздуха будет направлена сначала на наружный ряд правильно расположенных отверстий, а затем быстро передвинута на внутренний, состоящий из меньшего числа также правильно расположенных отверстий. При этом окажется, что звук, полученный во втором случае, обладает значительно более низким тоном, чем в первом случае. Далее, направив воздушную струю на какой-либо определенный ряд отверстий, будем постепенно увеличивать скорость вращения диска. Высота тона все время будет возрастать.

Отсюда мы заключаем, что в ы с о т а т о н а м у з ы к а л ь н о й н о т ы з а в и с и т п р о с т о о т ч и с л а и м п у л ь с о в, д о с т и г а ю щ и х у х а в т е ч е н и е о д н о й с е к у н д ы. Е с л и з в у к с о з д а е т с я к о л е б л ю щ и м с я т е л о м, т о в ы с о т а т о н а з а в и с и т о т с к о р о с т и, с к о т о р о й п р о и с х о д я т к о л е б а н и я т е л а; п о с л е д н я я

же в свою очередь определяет длину волны по формуле $v = nl$.

388. Явление Допплера. Когда поезд, движущийся с большой скоростью, проносится мимо наблюдателя, последний замечает, что в высоте тона паровозного свистка или колокола внезапно происходит заметное изменение в тот момент, когда паровоз проходит мимо него: высота тона при приближении паровоза выше, чем когда последний удаляется от наблюдателя. Объясняется это явление следующим образом: колокол посылает импульсы через строго определенные, равные промежутки времени. Однако при приближении поезда промежуток между моментами, когда эти сотрясения достигают уха, короче интервалов, через которые они производятся свистком или колоколом, потому что за время между посылкой двух последовательных импульсов поезд успевает приблизиться к наблюдателю. Наоборот, при удалении поезда интервалы между моментами, когда эти импульсы сообщаются уху, становятся длиннее, потому что за промежуток времени между испусканием отдельных импульсов поезд удаляется от наблюдателя. Благодаря этому, высота тона колокола при приближении поезда выше, чем при его удалении. Это явление изменения высоты тона какого-либо звука, производимого приближающимся или удаляющимся телом, носит название явления или эффекта Допплера.

389. Сила звука. Сила или громкость звука зависит от количества энергии, сообщаемого им барабанной перепонке уха за единицу времени; т. е. при обычных условиях громкость зависит от интенсивности поступательного и обратного движения воздуха, прилежащего к ушной раковине, а последняя в свою очередь определяется расстоянием от источника и амплитудой (величиной размаха) его колебаний, при том условии, конечно, если звук распространяется все время в однородной среде.

Если определенное звуковое сотрясение может одинаково свободно распространяться по всем направлениям, то на расстоянии 100 *м* от источника та же самая энергия должна распределиться по сфере, поверхность которой в четыре раза больше поверхности сферы на расстоянии 50 *м*. Следовательно, при этих идеальных условиях сила звука меняется обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. Однако, когда звук вынужден распространяться в трубе, так что энергия все время передается от одного слоя другому такой же площади, он может не ослабевая пройти значительное расстояние. Этим объясняется действие рупоров.

Резюме. **Все звуки производятся движением материи. Звук распространяется через твердые тела, жидкости и газы, но не через пустоту.**

Связь между скоростью звука, длиной волны и частотой выражается формулой $v = hl$.

Музыкальные звуки производятся колебаниями, следующими друг за другом через правильные промежутки времени; звуки же от неправильных сотрясений называются шумом.

Высота тона зависит от числа колебаний в секунду.

Сила звука (громкость) зависит от амплитуды колебаний.

Вопросы и ответы.

1. Когда длинная колонна людей марширует под оркестр, легко заметить, что передние ряды идут не совсем в ногу с задними. Объясните причину этого явления.

2. Удар грома был слышен через 5,5 сек. после вспышки молнии. Определите, на каком расстоянии находилась туча, если температура воздух была в это время равна 20°.

3. Удар молотком по стальному тросу можно было услышать через кабель по прошествии 0,2 секунды, а через воздух на 2.8 секунды позже. Температура была 18°. 1) На каком расстоянии был нанесен удар? 2) Чему равнялась скорость звука в тросе?

4. Из того факта, что игра оркестра без какого-либо искажения достигает определенного слушателя, какое заключение можно вывести относительно скорости распространения звуков различной высоты тона?

5. Какая существует связь между высотой тона и длиной волны? Как эта связь вытекает из факта, указанного в вопросе 4?

6. Если частота звука человеческого голоса равна 160, то волны какой длины создаются в воздухе при температуре в 18° при разговоре?

7. Если мы увеличим амплитуду колебаний гитарной струны, то какое действие окажет это на амплитуду волны? На силу звука? На длину волны? На высоту тона?

8. Почему после удара колокола звук замирает очень медленно?

9. Какова относительная громкость выстрела пушки в пункте A, отстоящем от пушки на 1 *км*, и в другом пункте B — на расстоянии от пушки в $^1/_4$ *км*?

10. Объясните, на чем основано действие слуховой трубки для тугоухих.

11. Объясните, почему высота тона паровозного свистка или автомобильного гудка внезапно падает сразу после того, как паровоз или автомобиль проехал мимо вас?

ОТРАЖЕНИЕ, УСИЛЕНИЕ И ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ.

390. Эхо. Хорошо всем знакомое явление эхо показывает, что звуковая волна, встретившая препятствие, например, в виде стены, претерпевает отражение. Раскаты грома вызываются последовательными отражениями звука от облаков и других поверхностей, находящихся на различных расстояниях от наблюдателя.

В обыкновенных помещениях расстояния между стенами настолько малы, что отраженные волны успевают вернуться, прежде чем исчезнет первоначальное действие звука на ухо. Вследствие этого усиливается первоначальный звук. В частности, этим объясняется, почему оратор слышен значительно лучше в закрытом помещении, чем на открытом воздухе. Так как ухо не может различать звуков, интервалы между которыми составляют меньше 0,1 секунды, а звук проходит в 0,1 секунды меньше 30 *м*, то отсюда следует, что стена, расположенная ближе 30 *м*, не может создать заметного эхо. В помещениях, размеры которых допускают появление эхо, следует покрывать стены каким-либо поглощающим веществом.

Шепчущие галереи, как, например, купол Вашингтонского капитолия, представляют собою помещения, устроенные таким образом, что звуковые волны, отраженные от стен, сосредоточиваются в определенных местах, которые являются как бы звуковыми фокусами.

391. Резонанс. Резонанс представляет собой у с и л е н и е звука, происходящее от наложения друг на друга п р я м о й и о т р а ж е н н о й волн.

Будем держать ножку колеблющегося камертона, совершающего, например, 512 колебаний в секунду, над отверстием трубы около 3 *см* диаметром, установленной, как показано на рис. 354, так, чтобы поднятием или опуска-

нием сосуда A мог быть установлен по желанию уровень воды в трубке. При этом обнаруживается, что при медленном опускании уровня воды в некоторой точке произойдет заметное усиление звука.

Будем производить этот же опыт с камертонами различной высоты тона. Мы найдем, что чем ниже тон камертона, тем ниже должна быть вода в трубке для получения наилучшего усиления. Это значит, что чем больше длина волны производимой камертоном ноты, тем длиннее должен быть столб воздуха для получения резонанса.

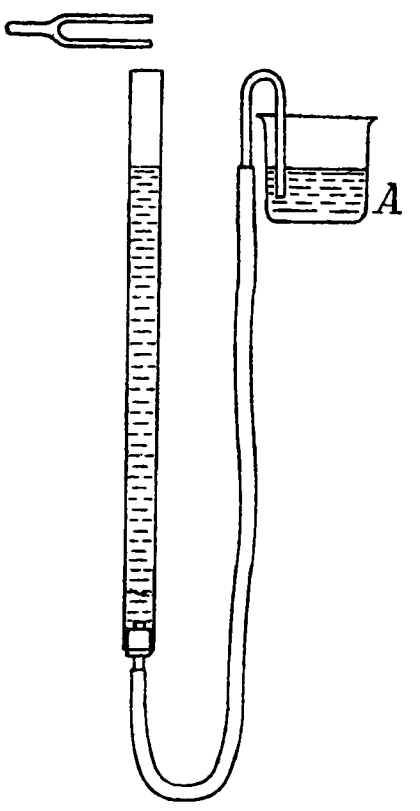


Рис. 354. Явление резонанса.

Отсюда мы заключаем, что между длиной звуковой волны и длиной воздушного столба, который будет ее усиливать, существует определенное соотношение.

392. Условие резонанса для закрытой трубы. Если мы вычислим длину волны ноты камертона, разделив скорость звука на число колебаний камертона, то окажется, что во всех случаях длина воздушного столба, дающая наилучшее усиление звука, составляет приблизительно четверть длины волны. Причина этого сразу же станет нам ясна, если мы сообразим, что эта длина должна быть как раз такова, чтобы отраженная волна успела вернуться к отверстию трубы и совпасть с прямой волной в тот самый момент, когда последняя посылается ножкой камертона. Так, например, когда ножка камертона отклоняется из положения A вниз (см. рис. 355), это является началом сгущения, распространяющегося вниз по трубе.

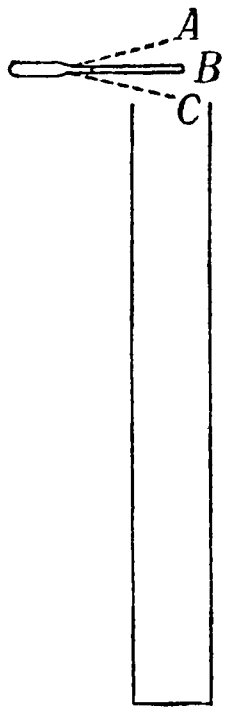


Рис. 355. Резонансная длина закрытой трубы составляет одну четверть длины волны.

Для того чтобы это сгущение успело вернуться к отверстию трубы и присоединиться к прямой волне, посылаемой камертоном, оно должно отразиться от дна трубы в тот момент, когда камертон из положения C начинает перемещаться вверх. Другими словами, пока камертон совершает половину колебания, сотрясение должно пройти всю трубу и вернуться обратно. Это значит, что весь путь туда и обратно должен составлять половину длины волны и, следовательно, длина трубы должна равняться четверти длины волны.

Из предыдущего ясно, что явление резонанса должно иметь место и в том случае, когда отраженная волна достигает отверстия в момент вторичного выхода камертона из положения C, т. е. в конце третьего полуколебания. Расстояние от камертона до верхнего уровня воды и обратно должно в этом случае составлять полторы длины волны, т. е. поверхность воды должна теперь стоять в трубе на половину длины волны ниже. Следовательно, длина трубы должна теперь равняться трем четвертям длины волны.

Если мы снова обратимся к опыту, то, действительно, обнаружим резонанс. Однако он будет выражен несколько слабее, чем раньше, потому что

волна потеряла некоторую часть своей энергии, так как она прошла по трубе больший путь. Таким же способом можно показать, что резонанс получится и при длине трубы, равной $^5/_4$, $^7/_4$ или любому нечетному числу четвертей длины волны.

393. Условие резонанса для открытой трубы. Поднесем тот же самый камертон, как и в опыте § 393, к отверстию открытой трубы в 20 или 25 *см* длиною. Длину трубы можно изменять по желанию, вставив стеклянный цилиндр, открытый с обоих концов, в картонную трубку подходящего диаметра и вдвигая или выдвигая его (рис. 356). При этом окажется, что при некоторой определенной длине открытая труба будет резонировать так же сильно, как и закрытая, но длина трубы, дающая резонанс, будет в два раза больше, чем раньше. То же самое получится при удлинении трубы в два, три и большее число раз.

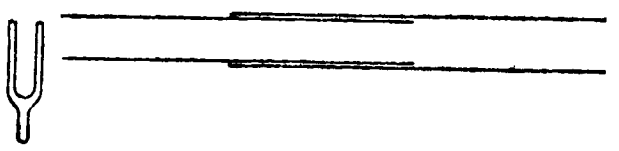


Рис. 356. Резонансная длина открытой трубы составляет половину длины волны.

Отсюда мы заключаем, что для получения резонанса наименьшая длина открытой трубы составляет половину длины волны; кроме того резонанс получается при длине трубы, являющейся любым кратным числом полуволн.

То обстоятельство, что наименьшая длина открытой трубы, при которой получается резонанс, в два раза больше, чем закрытой, служит экспериментальным подтверждением того факта, что сгущение, достигнув открытого конца трубы и отразившись, обращается в разрежение. Это значит, что когда конец трубы (см. рис. 357) открыт, сгущение, достигнув его, внезапно претерпевает расширение. При этом получается новый импульс, начинающий в этот момент распространяться по трубе в обратном направлении и сообщающий частицам движение вниз, а не вверх, т. е. частицы движутся в направлении, противоположном распространению волны. Такое явление всегда имеет место при разрежении (см. рис. 350). Для того чтобы совпасть с движением камертона, это движение частиц должно достигнуть верхнего отверстия трубы в тот момент, когда камертон вторично отклоняется вниз из положения *A*, т. е. после одного полного колебания камертона. Отсюда ясно, почему длина трубы должна составлять полволны. На рис. 357 сопоставлены различные данные относительно длин как закрытых, так и открытых труб.

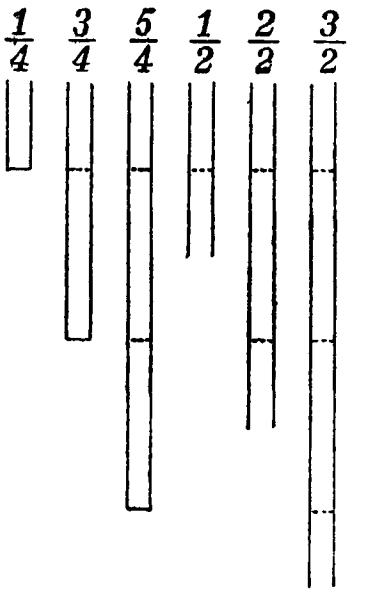


Рис. 357. Закрытые и открытые трубы, резонирующие на один и тот же камертон.

394. Резонаторы. Если заменить в предыдущих опытах колеблющийся камертон у отверстия трубы рядом волн, приходящих от отдаленного источника, то точно такое же рассуждение приведет нас к заключению, что волны, отразившиеся от дна трубы, будут усиливать вновь приходящие волны в том случае, когда длина трубы равняется любому нечетному числу четвертей длин волн — для закрытой трубы, или любому числу полуволн — для открытой трубы. Отсюда ясно, что любая воздушная камера явится резонатором для последовательности волн определенной длины. Этим объясняется, по-

чему большие раковины «звучат», издают глухой рокот определенного тона, если поднести их к уху. Дело в том, что слабые волны, не вызывающие в невооруженном ухе никакого впечатления, приобретают благодаря раковине значительную силу. В том случае, когда воздушная камера имеет неправильную форму, не всегда удается вычислить, на какую длину волны она будет резонировать, однако всегда можно установить опытным путем, какую именно длину волны она будет усиливать. Резонаторы, на которые устанавливается камертон, представляют собою воздушные камеры такого размера, чтобы они резонировали на ноту, даваемую камертоном.

395. Вынужденные колебания; деки музыкальных инструментов. Заставив камертон звучать, будем держать его в руке. Звук камертона будет настолько слаб, что его можно будет услышать только на весьма близком расстоянии. Приложим основание камертона к столу. Сила звука возрастет во много раз. Прижмем к тому же самому столу другой камертон другой высоты тона. В его звучании также произойдет усиление. Таким образом, стол усиливает звук любого поставленного на него камертона, в то время как воздушный столб определенных размеров может усиливать только одну ноту.

Причина усиления звука в обоих случаях совершенно различна. В последнем случае колебания камертона передаются через его основание крышке стола и заставляют последнюю совершать колебания его собственного периода. Колеблющаяся крышка стола благодаря своей большой поверхности приводит в движение сравнительно большие массы воздуха и таким образом посылает уху мощную волну, в то время как один камертон с его узкими ножками не мог сообщить воздуху такое количество энергии. Колебания в роде тех, которые производятся крышкой стола, носят название в ы н у ж д е н н ы х, потому что они могут быть вызваны любым камертоном независимо от его периода. Деки в музыкальных струнных инструментах служат точно той же цели, как и крышка стола в описанном опыте; другими словами, они производят вынужденные колебания при любой ноте инструмента и соответственно усиливают ее.

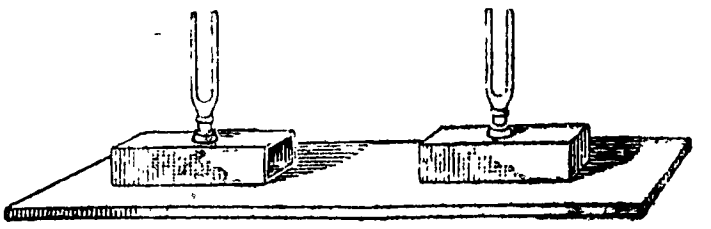


Рис. 358. Расположение камертонов для получения биений.

396. Биения. Так как две звуковые волны могут сочетаться таким образом, чтобы усиливать друг друга, то, очевидно, возможны и такие их сочетания, когда волны взаимно уничтожаются. Другими словами, при подходящих условиях с о ч е т а н и е д в у х з в у к о в может создать тишину.

Поставим рядом на столе два одинаковых камертона, укрепленных на резонаторных ящиках (см. рис. 358). Затем деревянной катушкой или резиновой пробкой, насаженной на палку, ударим по камертонам — сначала по одному, а затем быстро по другому. Оба тона сольются и дадут ровный звук. Затем налепим на ножку одного камертона кусочек воска или небольшую монету. Тем самым число колебаний, производимых этим камертоном в секунду, несколько уменьшится, потому что масса его возросла. Снова заставим звучать вместе оба камертона. Первоначальный ровный звук заменится колеблющимся, пульсирующим звуком. Явление это, получившее название б и е н и й, вызывается переменным уничтожением и усилением звуков, создаваемых обоими камертонами.

Для уяснения механизма, вызывающего попеременное уничтожение и усиление звука, предположим, что один камертон совершает 256 колебаний в секунду (см. на рис. 359 пунктирную линию AC), а другой — 255 (см. на рис. 359 сплошную линию AC). Если в начале некоторой определенной секунды, от которой производится отсчет времени, оба камертона колебались в одинаковой фазе, например, оба посылали наблюдателю сгущения одновременно, то сгущения эти, конечно, сольются и будут действовать на ухо с двойной силой (см. A' рис. 359). Так как один камертон успевает за секунду совершить на одно полное колебание больше второго, то к концу рассматриваемой секунды оба камертона снова будут колебаться вместе, т. е. одновременно посылать сгущения, действия которых будут складываться, как и раньше (см. C'). Однако в середине этой секунды оба камертона колебались в противоположных направлениях (см. B); т. е. один создавал разрежения, в то время как второй посылал сгущения. Для уха наблюдателя сочетание разрежения (попятного движения частиц воздуха), даваемого одним камертоном, со сгущением (поступательным движением), производимым другим, создает впечатление отсутствия всякого движения, если оба эти движения обладают одинаковой энергией; т. е. посередине секунды оба звука, сочетаясь вместе, создают тишину (см. B'). Из предыдущего ясно, что число колебаний в секунду равно разности чисел колебаний обоих камертонов.

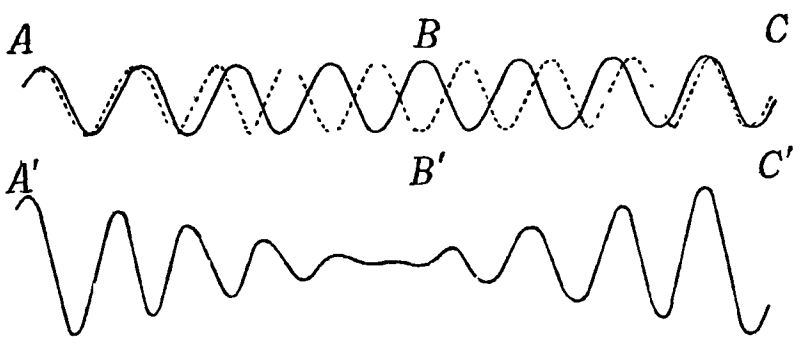


Рис. 359. Графическое изображение биений.

Для проверки этого заключения приклеим к ножке с грузом еще немного воска или более тяжелую монету; число биений в секунду возрастает. Облегчение груза уменьшит число биений в секунду.

При настройке пианино о том, что двойные и тройные струны звучат в унисон, судят по исчезновению биений.

397. Интерференция звуковых волн при отражении. Насадим на конец медного латунного стержня длиной от 1 до 2 *м* тонкую пробку диаметром

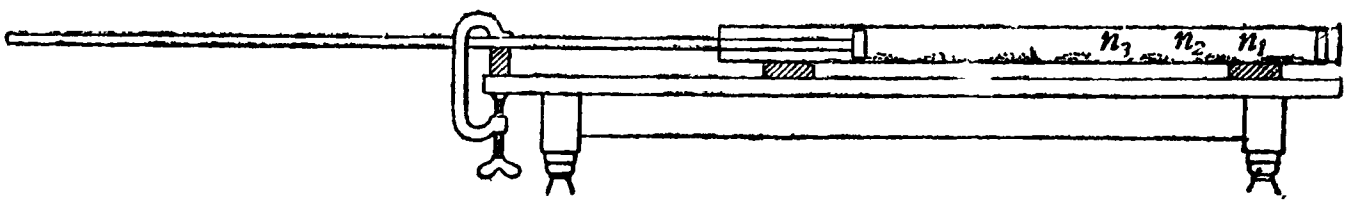
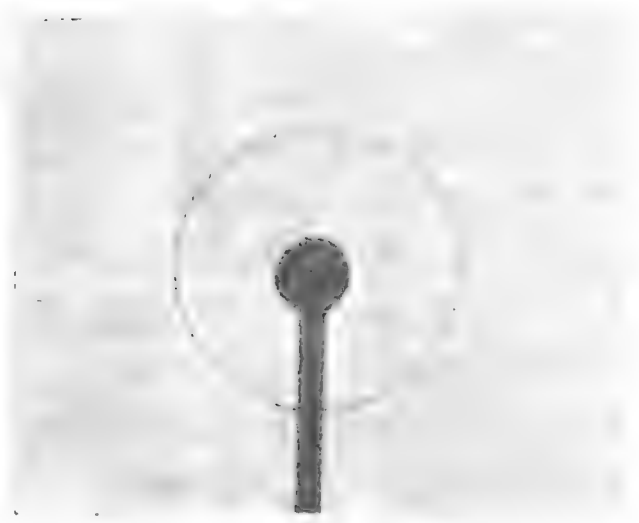


Рис. 360. Интерференция поступательной и ретроградной последовательности звуковых волн.

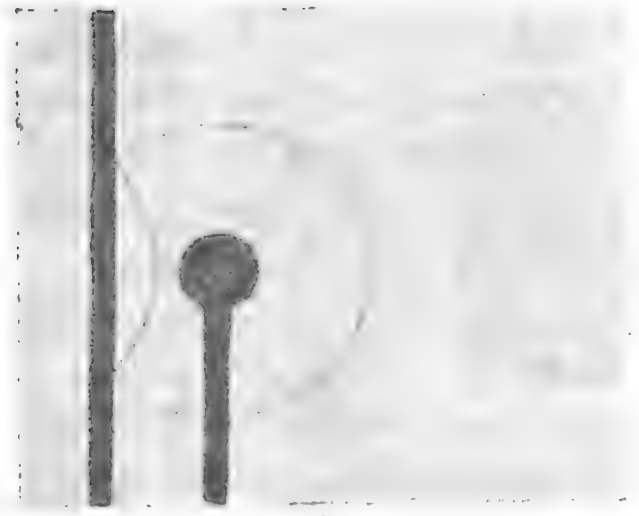
около 2,5 *см*. Крепко зажмем этот стержень посередине, как показано на рис. 360. Затем возьмем кусок стеклянной трубки длиною в метр или больше и от 2,5 до 3,5 *см* в диаметре и расположим ее так, чтобы пробка вошла внутрь трубки. Потрем конец стержня в продольном направлении хорошо прорезиненной материей. Получится громкий, резкий, пронзительный звук.

Дело в том, что трением прорезиненной материи о поверхность стержня последнему сообщаются продольные колебания; при этом концы его про-

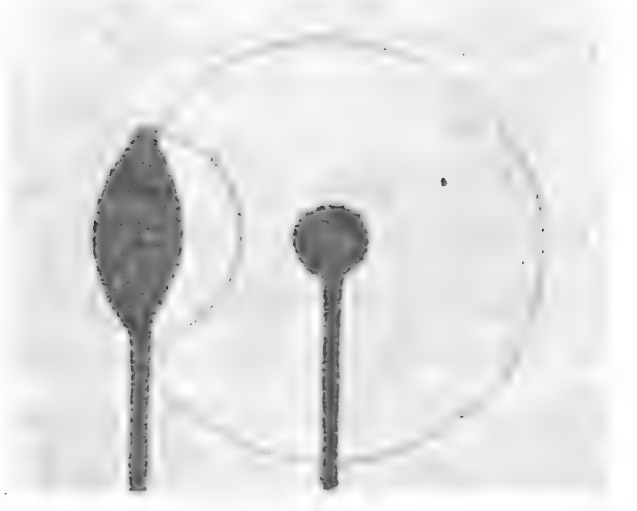


(1)

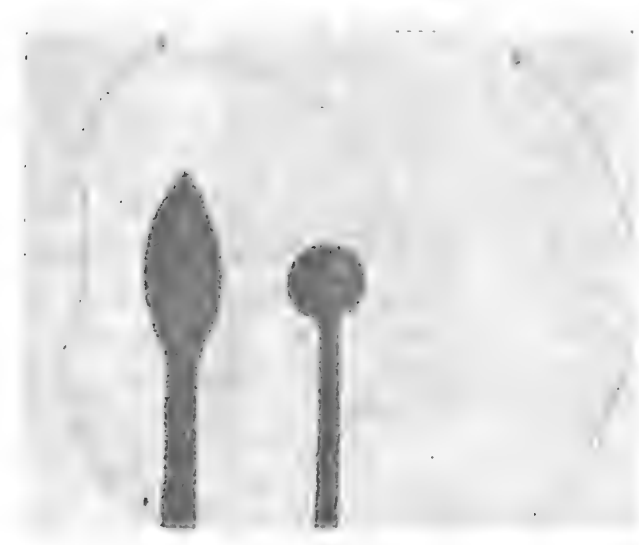
(2)



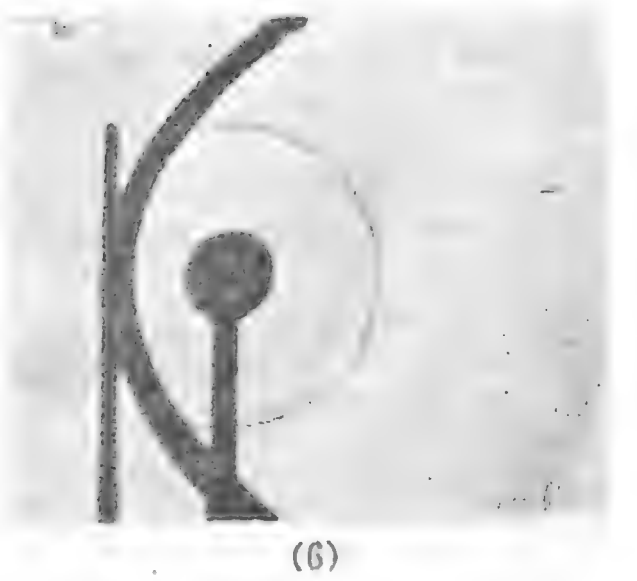
(3)



(4)



(5)



(6)

ФОТОГРАФИИ ЗВУКОВЫХ ВОЛН ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИСКРЫ, НАХОДЯЩЕЙСЯ ПОЗАДИ ЦЕНТРА ЧЕРНОГО ДИСКА.

1) Сферическая звуковая волна, 2) та же волна через 0,00007 сек., 3) волна, отраженная от плоской поверхности, кривизна не изменилась, 4) волна, отраженная от выпуклой поверхности, кривизна увеличилась, 5) источник в фокусе линзы из $Si\,O_2$. На фотографии видна, во-первых, прежняя волна — направо; во-вторых, отраженная волна с увеличившейся кривизной и, в-третьих, смещенная плоская волна, 6) источник в фокусе вогнутого зеркала. Отраженная волна — плоская.

изводят попеременно сгущения и разрежения в соприкасающихся с ними слоях воздуха. При этом пробочная пыль внутри трубы сразу же придет в оживленное движение. Если же этого не удастся сразу же заметить, то следует немного передвинуть трубу назад или вперед. Присмотревшись, легко заметить, что движение пробочной пыли не равномерно; через правильные промежутки вдоль трубы имеются области полного покоя, n_1. n_2 n_3, и т. д. отделенные областями оживленного движения.

В областях, где движение отсутствует, звуковые волны, отразившиеся от конца трубы, нейтрализуют действие волн, распространяющихся вдоль трубы по направлению от колеблющегося стержня. Точки эти носят название у з л о в, промежуточные же части называются п у ч н о с т я м и. Расстояние между узлами равняется полуволне; действительно, в тот момент, когда фронт a_1 первой волны (рис. 361) достигает конца трубы, происходит отражение, и волна начинает возвращаться обратно в R. Так как в этот момент фронт второй волны a_2 находится как раз на одну волну влево от a_1, оба волновых фронта должны встретиться в точке n_1 на расстоянии полуволны от конца трубы. Совершенно одинаковые, но противоположные движения частиц на фронтах обеих волн полностью уничтожают друг друга. Поэтому в точке n_1 движение не происходит, т. е. она является узлом. Далее в тот момент, когда фронт отраженной волны a_1 встретил фронт волны a_2, движущейся поступательно, в точке n_1, фронт третьей волны a_3 находится как раз на одну волну влево от n_1. Следовательно, если фронт первой волны a_1 продолжает двигаться обратно к R, то он встретит a_3 в точке n_2, как раз на расстоянии полуволны от n_1, где и образуется второй узел. Точно так же третий узел получится в точке n_3 на расстоянии полуволны вправо от n_2 и т. д. Итак, р а с с т о я н и е м е ж д у д в у м я у з л а м и всегда должно быть в точности равно половине длины распространяющихся волн.

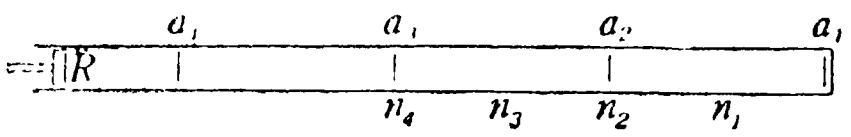


Рис. 361. Расстояние между узлами составляет половину длины волны.

Во всем нашем рассуждении предполагалось, что две волны, распространяющиеся в противоположных направлениях, могут пройти одна сквозь другую без какого-либо изменения каждой из них. На следующем опыте с шарами, использованными в § 381, легко показать, что два противоположных движения действительно распространяются описанным образом через среду, состоящую из упругих частиц.

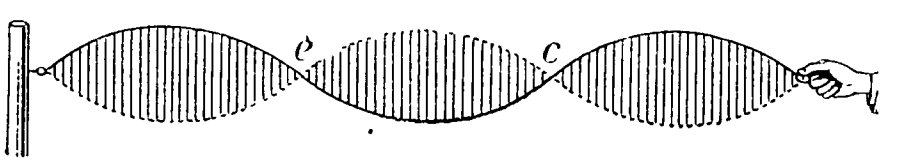


Рис. 362. Узлы и пучности струны.

Поднимем шары одного какого-либо ряда, предположим, на высоту 5 *см*, а шарик на другом конце — на высоту 10 *см*. Затем отпустим одновременно оба шарика. Оба этих противоположных движения передадутся через весь ряд шариков без всякого изменения. Другой способ получить еще более наглядную картину условий, существующих внутри трубы (рис. 360,) заключается в следующем: заставим просто колебаться один конец веревки длиною в 2 — 3 *м*, как на рис. 362. Волны как прямые, так и отраженные, непрерывно распространяющиеся в обе стороны вдоль веревки, сочетаясь, образуют ряд узлов и пучностей. Узлы в точках *c* и *e* представляют собой такие места, где волна, движущаяся поступательно (влево), и отраженная волна заставляют веревку с одинаковой силой двигаться в противоположных направлениях. Расстояние между ними равняется половине длины тех

волн, которые посылаются вдоль веревки рукой, заставляющей ее колебаться.

Резюме. **Наименьшая длина закрытой трубы, при которой получается резонанс, равняется четверти длины волны. (Резонанс получается также и в том случае, если длина трубы равняется любому нечетному кратному этой длины).**

Наименьшая длина открытой трубы, при которой получается резонанс, равняется полуволне. (Резонанс получается также и в том случае, если длина трубы равняется любому числу полуволн.)

Биения звуков происходят при попеременном усилении и ослаблении двух рядов волн, отличающихся частотой; число колебаний в секунду равняется разности этих двух частот.

Вопросы и задачи. [1]

1. Почему эхо, которое бывает иногда таким звучным в пустых залах, пропадает, когда зал полон народом?

2. Через четыре секунды после пушечного выстрела пришло эхо от айсберга. На каком расстоянии от пушки находился айсберг? Температура воздуха была равна 0°С.

3. Артиллерист слышит эхо через $5^1/_2$ секунд после произведенного им выстрела. На каком расстоянии от него находится отражающая поверхность, если температура воздуха — 20°С?

4. Объясните происхождение звука, который получается, если дуть в горлышко пустой бутылки. Объясните также, почему меняется высота тона, если налить в бутылку немного воды.

5. Объясните происхождение журчания, которое можно услышать, поднеся к уху раковину, большой стакан или пустую банку.

6. Объясните подробно, что такое резонанс и вынужденное колебание и какая между ними разница.

7. Какова должна быть наименьшая длина закрытой трубы, которая бы могла служить резонатором для камертона, совершающего 427 колебаний в секунду (температура 20°С)?

8. Наименьшая длина закрытого воздушного столба, который давал резонанс с камертоном, составляла 32 *см*. Найдите число колебаний камертона, если скорость звука равнялась 340 *м/сек*.

9. Найдите число колебаний в секунду камертона, вызывающего резонанс в закрытой трубе длиною в 30 *см*, в открытой трубе той же длины (примите скорость звука равной 340 *м/сек*.)

10. Произойдет ли изменение (и какое) в тоне органной трубы, если поднимется температура? Дайте подробный ответ.

11. Два камертона, один из которых совершает 256 колебаний в секунду, при одновременном звучании производят 5 колебаний в секунду. Сколько колебаний совершает другой камертон?

12. Камертон, совершающий 256 колебаний в секунду, дает 4 биения в секунду при звучании в другом камертоне. Если к первому камертону прилепить кусочек воска, то число биений в секунду уменьшится до трех. Какова частота другого камертона?

ГЛАВА XVII.

СВОЙСТВА МУЗЫКАЛЬНЫХ ЗВУКОВ.

МУЗЫКАЛЬНЫЕ ГАММЫ.

398. Физические принципы, лежащие в основе музыкальных интервалов. Возьмем металлический или картонный диск диаметром в 25 или 30 *см*, снабженный четырьмя концентрическими рядами равноотстоящих отверстий причем каждый ряд содержит соответственно 24, 30, 36 и 48 отверстий (рис.

---

[1] Дополнительные вопросы и задачи к главе XVI помещены в приложении

363). Отверстия должны иметь около 6 *мм* в диаметре, а каждый ряд должен отстоять от другого приблизительно на 12 *мм*. Приведем затем этот диск (сирену) во вращение с постоянной скоростью. Затем направим воздушную струю, как в § 386, последовательно на каждый из рядов с отверстиями. Мы услышим последовательно ноты м и, с о л ь, д о. Если увеличить скорость вращения, то возрастет высота тона каждой ноты, последовательность их останется без изменений.

Отсюда мы приходим к заключению, что последовательность до, ми, соль, до состоит из нот, числа колебаний которых находятся в отношении чисел 24, 30, 36, 48, или 4, 5, 6, 8, и что эта последовательность не зависит от абсолютных чисел колебаний соответствующих тонов.

Далее, когда две ноты, отстоящие друг от друга на одну октаву, звучат вместе, они образуют самое гармоничное сочетание, какое только может быть получено. О характерной особенности нот, разделенных одной октавой, было известно еще в самые древние времена, задолго до того, когда что-либо стало известно относительно соответствующих чисел колебаний. Предыдущий опыт показывает, что эти числа колебаний находятся в простом отношении друг к другу, а именно они относятся, как 24 к 48, или 1 к 2. Другой музыкальный интервал, соответствующий другому гармоничному сочетанию, может быть образован нотами д о и с о л ь. Наш опыт показывает, что в этом случае числа колебаний относятся, как 24 к 36, или 2 к 3. При совместном звучании с о л ь и д о числа колебаний находятся в отношении 36 к 48, или 3 к 4. Мы видим, следовательно, что числа колебаний, соответствующие трем нотам д о, с о л ь, до', находятся в весьма простом отношении друг к другу, а именно они относятся, как 1 к 2, 2 к 3 и 3 к 4. Далее, наш опыт показывает, что другой музыкальный интервал д о, м и, также образующий гармоничное сочетание, соответствует числам колебаний, которые относятся друг к другу, как 24 к 30, или 4 к 5. Мы заключаем отсюда, что числа колебаний, соответствующие нотам, образующим гармоничные музыкальные интервалы, находятся в весьма простом отношении друг к другу.

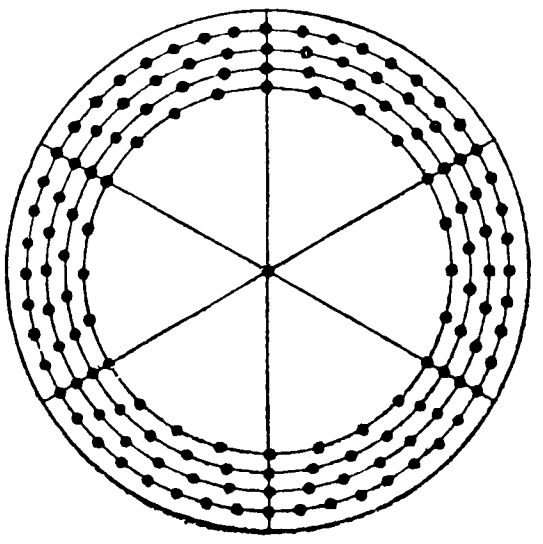


Рис. 363. Сирена для получения последовательности музыкальных тонов до, ми, соль, до.

399. Мажорная диатоническая гамма. При совместном звучании трех нот д о, м и, с о л ь, числа колебаний которых, как мы видели раньше, находятся в отношении 4 к 5 и к 6, получается замечательно приятное для слуха сочетание тонов. Это сочетание, которое было известно и применялось уже на заре музыкального развития человечества, носит название м а ж о р н о г о а к к о р д а. М а ж о р н а я д и а т о н и ч е с к а я г а м м а п о с т р о е н а из т р е х м а ж о р н ы х а к к о р д о в; она приведена в нижеследующей таблице, где первый мажорный аккорд обозначен цифрой 1, второй — цифрой 2 и третий — цифрой

Название	до	ре	ми	фа	соль	ля	си	до	ре
Обозначение	C	D	E	F	C	A	B	C′	D′
Относительные числа колебаний	24	27	30	32	36	40	45	48	54
	1		1		1				
					2		2		2
				3		3		3	

Аккорды д о, м и - с о л ь (тоника), с о л ь - с и - р е (доминанта) и ф а - л я - д о (субдоминанта) часто встречаются в музыке.

Обычно камертоны для физических лабораторий, дающие среднее C, обладают числом колебаний, равным 256, откуда для A получается число колебаний, равное $426\frac{2}{3}$. Для нормальных «музыкальных» камертонов за тон A по международному соглашению принято 435 колебаний.

400. Темперационная гамма. Если C принять за до и построить от него гамму, как показано выше, то окажется, что в этом новом ключе можно взять в каждой октаве по шести тонов из нашей таблицы, но потребуются еще две добавочных ноты (см. таблицу). Точно так же, для того чтобы построить гамму в любом ключе, требуемом современной музыкой, потребовалось бы около пятидесяти нот в каждой октаве. Поэтому в качестве компромисса октава разделена на двенадцать равных интервалов, соответствующих восьми белым и пяти черным клавишам рояля. Нижеследующая таблица показывает, в чем эта так называемая т е м п е р а ц и о н н а я г а м м а отличается от идеальной или диатонической гаммы.

Нота	C	D	E	F	G	A	B	C′	D′	E′	F¹	G¹
Диатоническая	256	288	320	$341\frac{1}{3}$;	384	$426\frac{2}{3}$;	480	512	576	640	682,2	768
Диатоническая в ключе G .	—	—	—	—	384	432	480	512	576	640	720	768
Темперационная	256	287,4	322,7	341,7	383,8	430,7	483,5	512	574,8	645,4	683,4	767,6

КОЛЕБАНИЯ СТРУН.

401. Законы колебания струн. Натянем две фортепианные струны над коробкой или ящиком с помощью рычагов таким образом, чтобы получился сонометр (рис. 364). Затем с помощью грузов *A* и *B* добьемся того, чтобы обе струны давали один и тот же тон. Используя явление биений, легко сделать это с весьма большой точностью. Затем прижмем одну из струн посередине трехгранной призмой *D* и затем заставим звучать обе струны. Получится созвучие д о, д о′. Затем прижмем призму на одной трети длины струны (от точки ее закрепления) и снова заставим звучать обе струны. Полученное созвучие образует интервал до-соль.

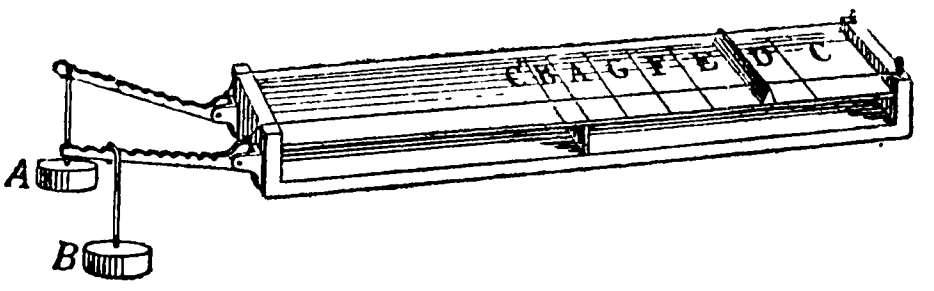


Рис. 364. Сонометр.

В § 398 было показано, что до′ соответствует вдвое большему числу колебаний, чем д о, а с о л ь — числу колебаний, которое в 1,5 раза больше. Так как длина струны, соответствующая до′, составляет половину длины струны, дающей д о., а длина струны для соль в $\frac{3}{2}$ раза больше, то, следовательно, из этого опыта мы за-

ключаем, что при прочих равных условиях ч и с л о к о л е б а н и й с т р у н ы о б р а т н о п р о п о р ц и о н а л ь н о е е д л и н е.

В таких музыкальных инструментах, как, например, пианино, разнообразие звуков достигается тем, что берутся струны различной длины, натяжения и массы на единицу длины.

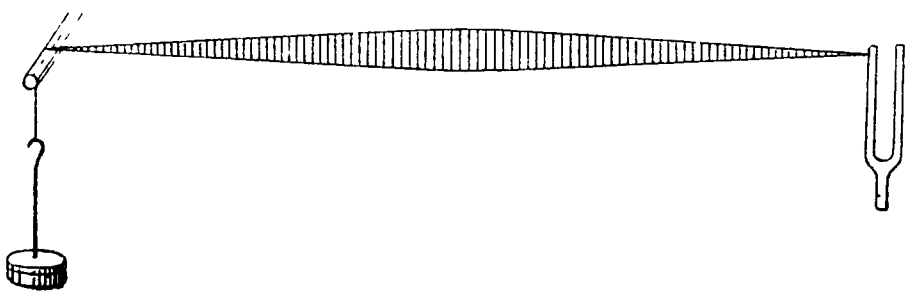


Рис. 365. Струна, колеблющаяся как целое.

402. Узлы и пучности в колеблющихся струнах. Привяжите струну в 1 *м* длиной к одной из ножек большого камертона, совершающего около 100 колебаний в секунду. Прикрепите другой конец струны, как показано на рисунке, и заставьте камертон колебаться. Если камертон не приводится в действие электромагнитом, что является наиболее желательным, то проведите по нему скрипичным смычком или ударьте его мягким молотком. Изменяя силу натяжения струны в 4 и 9 раз, можно будет заставить ее колебаться как целое (рис. 365) или разбившись на две или три части (рис. 366).

Явление это, как было объяснено в § 397, обусловлено интерференцией прямых и обратных волн, посылаемых вдоль струны колеблющимся камертоном. Однако в следующих параграфах мы покажем, что при изучении влияния, оказываемого колеблющейся струной на окружающий воздух, мы не допустим слишком большой ошибки, если представим себе, что воздух как бы сжат у каждого узла и как бы действительно колеблется, разбившись на три или четыре отдельные части.

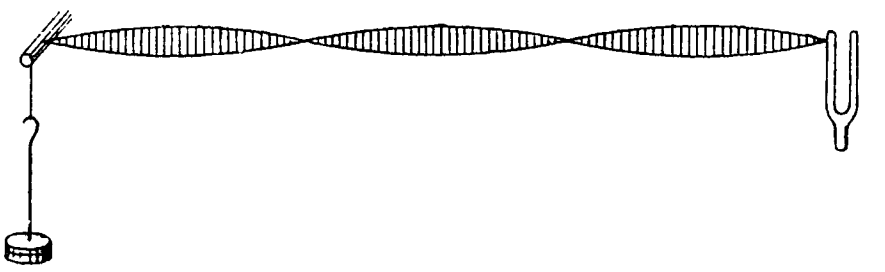


Рис. 366. Струна, колеблющаяся, разбившись на три части.

Резюме. **Гармонические музыкальные интервалы соответствуют простым отношениям чисел колебаний; так, например, в случае октавы числа колебаний относятся как 1 к 2.**

Мажорный аккорд состоит из тонов, числа колебаний относятся друг к другу, как 4 к 5 и к 6. Мажорная диатоническая гамма построена из трех мажорных аккордов.

Частоты колебаний одинаковых струн обратно пропорциональны их длинам и прямо пропорциональны корням квадратным из их натяжений.

Вопросы и задачи.

1. Частота колебаний какого-то камертона равна 512. Какова частота колебаний другого камертона, у которого высота тона на октаву выше? На октаву ниже?

2. Человек, поющий в комнате, в которой температура воздуха равна 20°С, посылает звуковую волну длиною в 2,75 *м*. Какова высота (частота) создаваемого звука?

3. Постройте диатоническую гамму, начиная с С = 264.

4. Определите длину волны самой низкой ноты пианино ($A_4 = 27{,}2$); длину волны самой высокой ноты ($C'''' = 4137$). (Скорость звука примите равной 344 *м* в секунду.)

5. Если среднее С соответствует 300 колебаниям в секунду, то какому числу колебаний соответствуют F и A?

6. Чему равна длина волны, соответствующая международной А, если скорость звука составляет 345 *м* в секунду?

7. Какие существуют три способа, с помощью которых фортепианные мастера получают звуки различной высоты?

8. Проволока в 50 *см* длиной дает 400 колебаний в секунду. Какое число колебаний она будет давать, если уменьшить длину до 10 *см*?

9. Струна дает ноту C при натягивании ее грузом в 4 *кг*. Какой величины груз потребуется для того, чтобы получить ноту G?

10. В какой точке должен скрипач зажать пальцем струну G, чтобы получить ноту C?

11. Если одна проволока вдвое длиннее другой и натягивается грузом, который в четыре раза больше груза, натягивающего первую струну, то в каком отношении находятся числа их колебаний?

ОСНОВНЫЕ ТОНА И ОБЕРТОНЫ.

403. Основные тона и обертоны. Если выводы § 402 верны, то струна, имеющая посередине узел, сообщает окружающему воздуху в секунду вдвое большее число импульсов, чем в том случае, когда она колеблется как целое. Проверить это на опыте можно следующим образом.

Дерните посередине струну сонометра (рис. 364) и определите высоту издаваемого ею тона. Затем коснитесь пальцем середины струны и дерните последнюю посередине между этой точкой и одним из концов струны.[1] Вы услышите звук октавой выше. Затем прижмите пальцем струну на расстоянии трети ее длины от одного из концов и затем снова дерните струну. Звук, который при этом получится, будет нотой соль′. Так как мы знаем из § 399, что ноте соль′ соответствует число колебаний, которое в 1,5 раза больше числа колебаний для до, следовательно, число колебаний в том случае, когда струна колебалась как целое, было в три раза меньше. Таким образом, струна, которая колеблется, разбившись на три отрезка равной длины, создает втрое большее число колебаний, чем в том случае, когда она колеблется как целое.

Когда струна колеблется как одно целое, она дает самую низкую ноту, какую только она может произвести. Эта нота называется основным тоном, или первой составляющей струны. Если заставить струну колебаться, разбив ее на две части, то она даст звук, который лежит на октаву выше основного тона и называется первым обертоном, или второй составляющей струны. Далее, если струна колеблется, разбившись на три равные части, то она дает ноту, соответствующую числу колебаний, которое в три раза больше колебаний основного тона, а именно ноту соль′. Эта нота носит название второго обертона, или третьей составляющей струны. Когда струна колеблется, разбившись на четыре части, получается третий обертон, лежащий двумя октавами выше основного тона. Обертоны струн часто называются гармониками, или высшими гармоническими составляющими. Числа колебаний обертонов стоят в отношении 2, 3, 4, 5, 6, 7 и т. д. к частоте колебаний основного тона.[2]

[1] Лучше всего убрать палец сейчас же после того, как вы дернете струну.

[2] Некоторые инструменты, как, например, колокола, могут давать более высокие тона, у которых частоты колебаний не представляют собой целых кратных частоты основного тона. Такие ноты все же носят название обертонов, но к ним уже не применяют термина «гармоника», сохраняя последний только для тех тонов, у которых числа калебаний выражаются целыми кратными некоторого основного тона.

Струны дают только гармонические составляющие

404. Одновременное возбуждение основных тонов и обертонов. До сих пор мы, создавая обертоны, заставляли струну оставаться неподвижной в некоторой соответственным образом выбранной точке, в то время как мы дергали струну.

Дернем теперь струну в точке, отстоящей от одного из концов на четверть длины, причем п о с т а р а е м с я н е к а с а т ь с я с е р е д и н ы с т р у н ы. Мы услышим вполне отчетливо основной тон; если же коснуться слегка середины струны, то звук при этом не исчезнет, но тон, который мы услышим, будет лежать октавою выше основного тона; отсюда следует, что в рассматриваемом случае на колебания струны, как целого, накладываются колебания струны, разбившейся на два равных отрезка (рис. 367). Когда мы коснулись середины струны, мы уничтожили первый вид колебаний, причем струна продолжала колебаться, разбившись на две части. Снова повторим этот опыт с той только разницей, что теперь мы дернем струну посередине, а не на расстоянии четверти ее длины от одного из концов. Если теперь коснуться середины звучащей струны, то звук исчезнет полностью; из этого следует, что в этом случае первый обертон отсутствует и не накладывается на основной тон. Далее снова дернем струну в точке, отстоящей на четверть длины от одного из концов, и обратим внимание на звук, который при этом получится. В нем легко будет различить основной тон и первый обертон, звучащие одновременно. Точно так же, дернув струну в точке, отстоящей на одну шестую длины от одного из концов, и затем коснувшись струны на расстоянии одной трети ее длины от конца, можно отчетливо выделить второй обертон, причем опытное ухо сможет различить его в издаваемом струной звуке даже в том случае, если не уничтожать основного тона, касаясь струны в указанной точке.

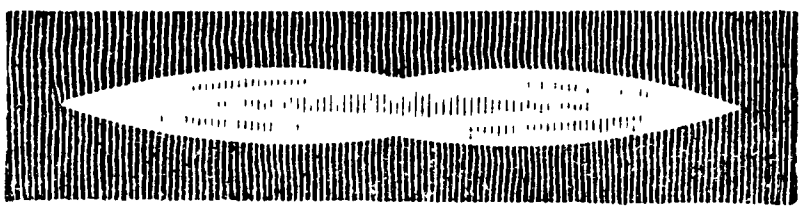


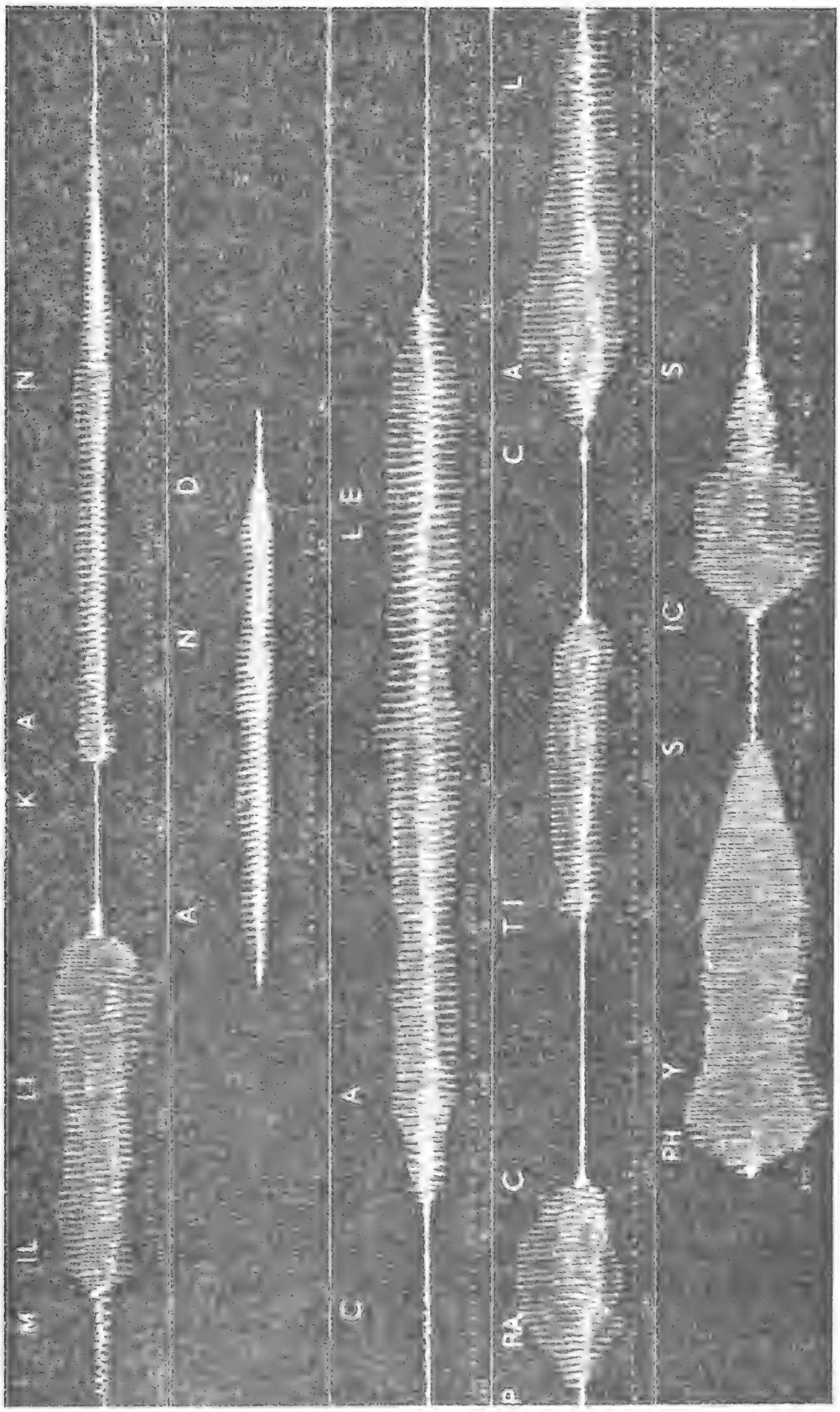
Рис. 367. Струна, одновременно подающая основной тон и первый обертон.

Опыты эти показывают, что, вообще говоря, если дернуть струну с о в е р ш е н н о п р о и з в о л ь н ы м о б р а з о м, т о п о л у ч и т с я с л о ж н а я н о т а, с о с т о я щ а я и з о с н о в н о г о т о н а и н е с к о л ь к и х о б е р т о н о в; к а к и е п р и э т о м п о я в л я ю т с я о б е р т о н ы, з а в и с и т о т т о г о, в к а к о й т о ч к е и к а к и м е н н о д е р н у т ь с т р у н у.

405. Тембр. Дернем струну сонометра сначала посередине, а затем у одного из ее концов. Два звука, которые при этом получатся, будут иметь совершенно одинаковую высоту, и они могут обладать также одинаковой интенсивностью, и все же легко заметить между ними разницу в том, что принято называть т е м б р о м. Опыт, описанный в предыдущем параграфе, показывает, что разница в тембре обусловлена тем, какие обертоны примешиваются в обоих случаях к основному тону.

Всем хорошо известно, что одна и та же самая нота звучит различным образом на пианино, на скрипке или на рожке. Описанный выше опыт приводит нас к заключению, что различие это обусловлено тем, что только о с н о в н о й т о н о д и н а к о в во всех трех случаях, а о б е р т о н ы — различны. Другими словами, свойство тона, называемое тембром, определяется просто числом и характером обертонов, сопутствующих основному тону. Если имеется всего несколько слабых обертонов, на фоне которых выделяется основной тон, то, как правило, получается мягкий и ласкающий слух звук, как, например, при игре на флейте или при ударе мягким молотком

о камертон. Появление сильных обертонов вплоть до пятого сообщает звуку полноту, как, например, в случае кларнета, скрипки или пианино, где на ряду с основным тоном значительную роль играют если не все, то во всяком случае некоторые из первых пяти обертонов. При появлении обертонов выше шестого звук приобретает острый



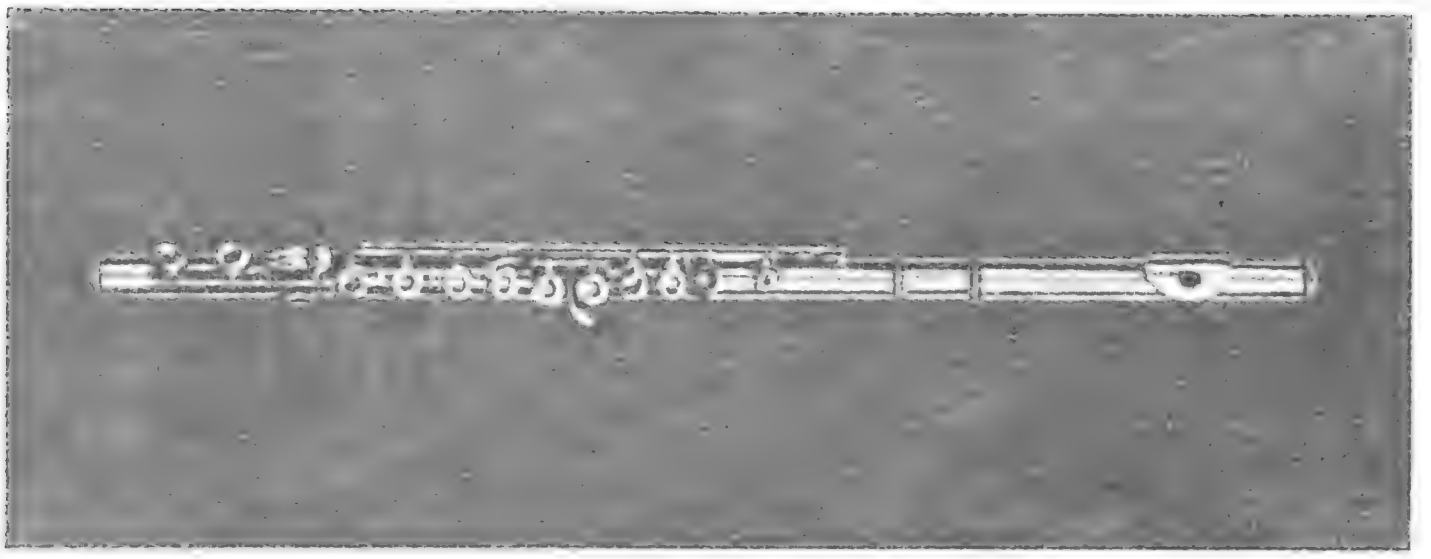
ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ ОТ ПРОИЗНЕСЕННЫХ СЛОВ.

Высота звука произнесенных слов была от 150 до 180. Волны вызывали колебания диафрагмы, которые передавались на зеркало, отражающее пучок света на движущуюся фотографическую пленку.

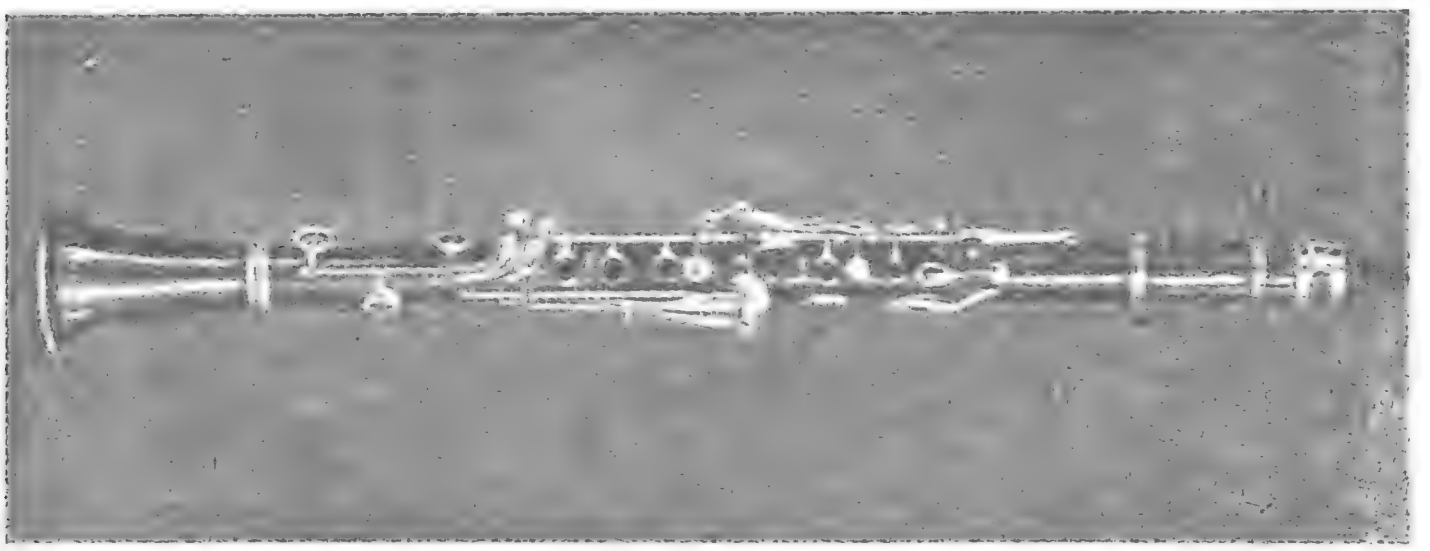
металлический оттенок, как, например, в случае удара какого-либо твердого тела о камертон. Во избежание этого неприятного тембра молоточки, ударяющие в пианино по струнам, обернуты войлоком или замшей.

406. Анализ звуков с помощью манометрического пламени. Если поставить два резонаторных ящика с камертоном C и C′ открытыми

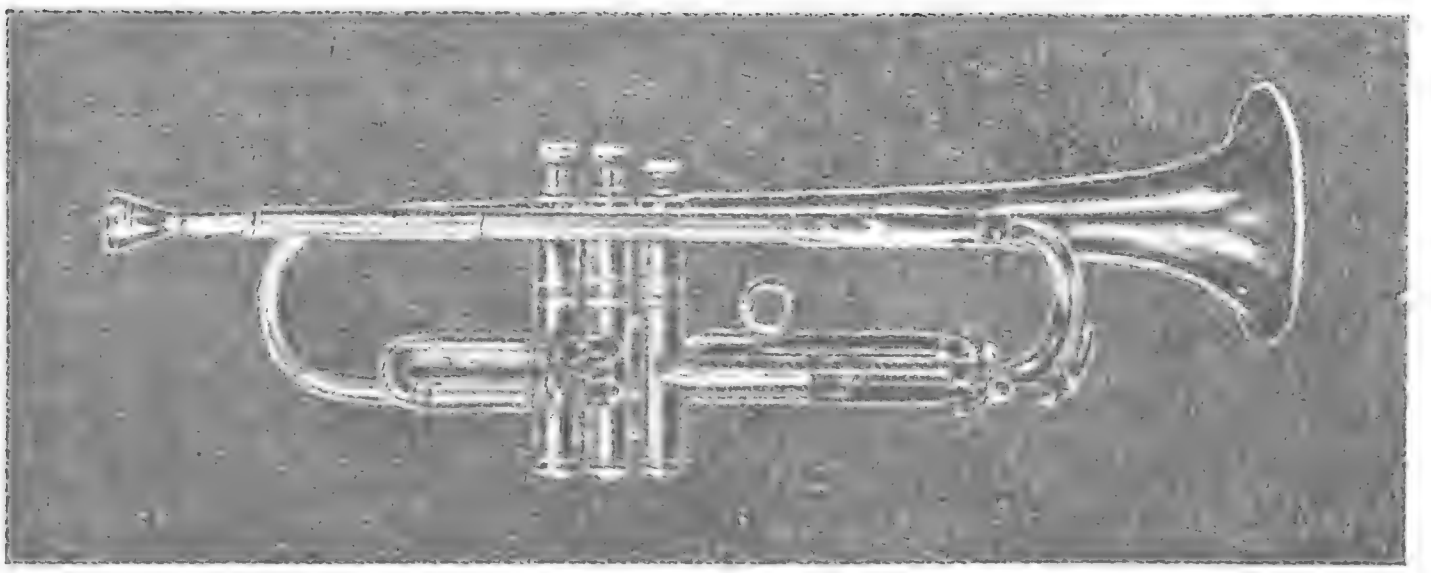
концами перед рупором C прибора, изображенного на этой стр., то получится картина, представленная в верхней части рис. 368. Сложный характер колебаний обусловлен тем, что здесь имеет место



ФЛЕЙТА.



КЛАРНЕТ.



КОРНЕТ.

3 различных типа инструментов, показанных на этом рисунке, имеют различные формы волны в зависимости от различного числа и различной интенсивности их обертонов. (См. §§ 414, 415 и 416.)

комбинация двух простых тонов, из которых один на октаву выше другого. Следовательно, любая нота, которая дает точно такую же картину, состоит из основного тона и одного только первого обертона.

Доказательством сложного характера большинства звуков является то, что анализ их с помощью манометрического пламени не приводит к картине, изображенной на стр. 282 и соответствующей простым тонам, а дает картину, представленную на рис. 368, соответствующую звуку, образованному комбинацией нескольких простых тонов. Нижние три ряда на этом рисунке были получены исследованием звуков *у*, *о*, *м*, *п*, обладавших одной и той же частотой. Замечательные фотографии на стр. 299, снятые профессором Д. Ч. Миллером, показывают чрезвычайную сложность звуков, из которых состоит человеческая речь.

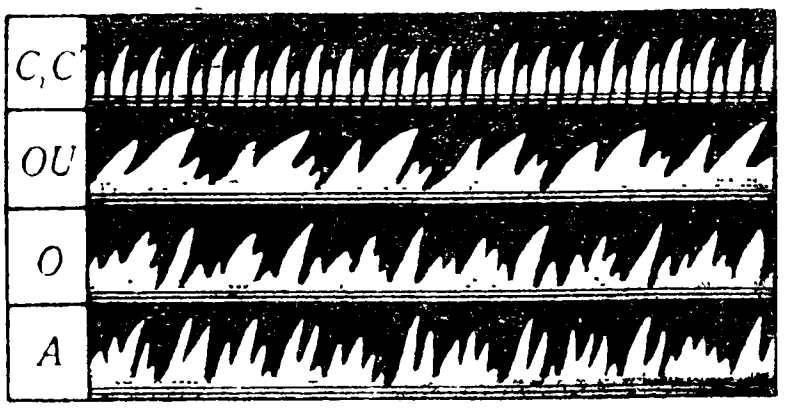


Рис. 368. Исследование звуков с помощью манометрического пламени.

407. Опыт Гельмгольца. Если поднять крышку рояля и, нажав педаль, громко пропеть, наклонившись над струнами, ноты о, и, э, а, то рояль воспроизведет эти звуки и передаст их почти без всякого искажения.

Для доказательства того, что тембр определяется только количеством и характером обертонов, примешивающихся к основному тону, Гельмгольц воспользовался методом, представляющим собой усовершенствование и дальнейшее развитие описанного опыта. Он построил большое число резонаторов в роде изображенного на рис. 369, каждый из которых отвечал на звук определенной высоты. Слушая какую-либо музыкальную ноту и быстро поднося эти резонаторы к уху один за другим, он выделял таким образом основные ее элементы, т. е. он находил, какие имеются в изучаемом звуке обертоны и какова их относительная интенсивность. Затем он воспроизводил первоначальный тон, заставляя одновременно звучать с соответствующей силой два, несколько или целую серию камертонов, у которых частоты колебаний находились друг к другу в отношении чисел 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7. Таким образом ему удавалось не только воспроизводить тембр разных музыкальных инструментов, но и получать различные гласные.

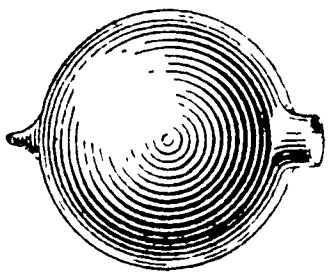


Рис. 369. Резонатор Гельмгольца.

408. Акустический резонанс. Поставим два камертона одинаковой частоты открытыми концами резонаторных ящиков друг против друга. Приведем один из них в действие, ударив его мягким молотком, а затем быстро остановим, зажав ножки камертона рукой. При этом окажется, что второй камертон будет звучать на всю комнату. Затем приклеим воском копеечную монету к одной из ножек второго камертона и повторим опыт сначала. Если теперь остановить первый камертон, то второй камертон уже не будет звучать.

Опыт этот иллюстрирует явление симпатических колебаний и показывает, какие условия необходимы для их появления. Если два тела, способных звучать, обладают одинаковым периодом собственных колебаний, то импульсы, сообщаемые окружающему воздуху при звучании одного из них, передаются другому телу через промежутки времени, в точности соответствующие его соб-

ственному периоду колебаний. Благодаря этому каждый импульс будет усиливать действие предыдущего, и хотя действие каждого единичного импульса незначительно, однако результирующее действие большого числа следующих один за другим импульсов может достигнуть значительной величины. Точно так же путем большого числа слабых толчков можно привести в колебание тяжелый маятник, если только отдельные толчки следуют друг за другом через промежутки времени, совпадающие с периодом собственных колебаний маятника. Однако, если существует какая-либо разница между периодами собственных колебаний двух звучащих тел, то каждый импульс не усиливает, а ослабляет действие предыдущих импульсов.[1]

409. Физический смысл консонанса и диссонанса. Укрепим, как показано на рис. 370, вертикально две стеклянные трубки диаметром около 2,5 *см* и длиною около 45 *см*. Впустим внутрь с помощью оттянутых стеклянных трубок диаметром в 5 *мм* горящую струю газа, причем высота пламени должна составлять приблизительно 2,5 *см* на расстоянии 7,5 — 10 *см* от нижнего конца трубок. Будем изменять давление газа до тех пор, пока трубки не начнут «петь». Не останавливаясь на вопросе о том, какова роль пламени в создании звука, обратим внимание на то, что оба тона звучат почти в унисон или, во всяком числе, настолько к нему близки, что в секунду получается всего несколько биений. Увеличим теперь немного длину одной из труб, вдвинув в нее бумажный цилиндр *S*. Количество биений очень быстро возрастет настолько, что нельзя уже будет различить отдельных биений, которые будут звучать режущим слух диссонансом.

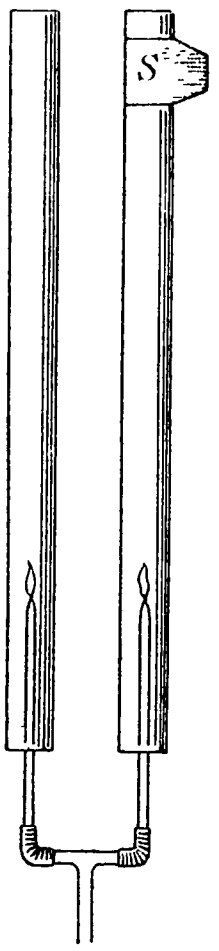


Рис. 370. Способ получения диссонанса.

Опыт этот показывает, что диссонанс является простым следствием биений. Если разница в частотах превосходит 5 — 6 колебаний в секунду, то в результате не получается чрезмерного неблагозвучия. Однако по мере возрастания этой разницы в частотах, а следовательно и числа биений в секунду, неблагозвучие также растет и становится наибольшим в том случае, когда разность частот достигает около тридцати колебаний в секунду. Таким образом, ноты B и C′, дающие около тридцати двух биений в секунду, производят наибольший диссонанс. Если разность частот равна, приблизительно, семидесяти, как, например, в случае C и E, то сочетание таких тонов снова получается гармоническим, т. е. оно создает приятное ощущение. Для того чтобы сочетание двух тонов оказалось гармоническим, необходимо не только, чтобы от основных тонов не получались неприятные биения, но чтобы такие биения не создавались и их обертонами. Так, например, C и B дают ужасный диссонанс, хотя они отличаются друг от друга большим число колебаний в секунду. Диссонанс в этом случае вызывается тоном B и C′, первым обертоном C.

Далее, существует целый ряд инструментов, наиболее поразительным примером которых являются колокола, создающие невыно-

---

[1] Пропоем перед роялем с поднятым модератором 2 ноты различной высоты. Каждый раз прорезонирует струна, высота которой соответствует высоте пропетой ноты. Если же спеть немного фальшиво, резонанса не будет.

симый диссонанс даже при одновременном звучании таких нот, как д о, с о л ь, д о′. Объясняется это тем, что эти инструменты, в отличие от струн и труб, обладают обертонами, не принадлежащими к числу гармонических, т. е. числа колебаний их обертонов не являются целыми кратными чисел колебаний основных тонов; поэтому такие обертоны создают биения между собой или с одним из основных тонов. Этим и объясняется, почему при колокольном перезвоне в колокола ударяют не одновременно, а в один за другим.

Резюме. **Тембр звука определяется числом и характером обертонов.**

Акустический резонанс возможен только в том случае, если два тела имеют одинаковый период собственных колебаний.

Диссонанс вызывается быстро следующими друг за другом биениями.

Вопросы и задачи.

1. По скрипичной струне проводят смычком приблизительно на расстоянии одной седьмой ее длины от одного из концов. Почему это лучше, чем проводить смычком по середине струны?
2. Что доказал Гельмгольц с помощью своих резонаторов?
3. Струна дает ноту G. Какой нотой будет ее четвертый обертон?
4. Какую ноту представляет собой четвертый обертон? Пятый обертон?
5. В некоторых европейских соборах запрещается извлекать из органов некоторые низкие ноты из опасения разбить одно или несколько покрытых росписью оконных стекол. Объясните, почему.
6. Три камертона дают соответственно 256, 288 и 512 колебаний в секунду. 1) Какие два камертона дадут при одновременном звучании наиболее приятное ощущение? 2) Какие два камертона дадут наибольший диссонанс? Объясните, почему.

ДУХОВЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ.

410. Основные тона закрытых труб. Всунем плотно сидящую резиновую пробку в стеклянную трубку *a* (рис. 371) 20 — 25 *см* длиною и около 2 *см* диаметром. Будем передвигать пробку вдоль трубки до тех пор, пока не станет получаться, как в § 392, резонанс с камертоном, дающим ноту C^1 и помещенным перед открытым концом трубки (длина свободного пространства внутри трубки составит 15 — 18 *см*). Затем уберем камертон и будем продувать около отверстия трубки струю воздуха через кусок трубки *b*, сплющенной на одном конце и укрепленной, как показано на рисунке. [1]

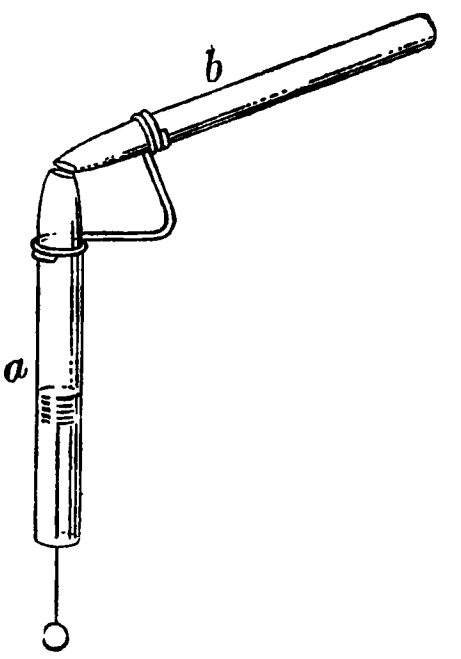


Рис. 371. Получение музыкальных звуков с помощью труб.

Опыт показывает, что нота, которую может создать труба, представляет собой ту самую ноту, на которую труба отвечает в качестве резонатора. В § 392 было установлено, что наилучший резонанс получается в том случае, когда длина звуковой волны, создаваемой камертоном, в четыре раза превосходит длину трубы. Следовательно, если поток воздуха, проходящий около отверстия трубы, направлен соответствующим образом, то получится звук, отвечающий длине волны, которая в

[1] Можно и просто дуть у краев трубки, внутри которой находится плотно сидящая резиновая трубка, которую можно передвигать взад и вперед.

четыре раза превосходит длину трубы. Звук этот называется основным тоном трубы и представляет собой самую низкую ноту, которую может создать труба.

411. Основные тона открытых труб. В § 393 мы нашли, что самый низкий звук, на который может резонировать открытая труба, обладает длиной волны, в два раза превосходящей длину трубы. Отсюда следует, что при соответственном выборе направления воздушной струи открытая труба должна дать звук, у которого длина волны в два раза превосходит длину самой трубы. Это значит, что если продувать воздух сквозь ту же самую трубу, но сначала с закрытым нижним концом, а потом с открытым, то первый звук будет октавою ниже второго. [1]

Таким образом, длина волны основного тона открытой трубы в два раза превосходит длину самой трубы.

412. Обертоны в трубах. В § 392 было установлено, что на один и тот же камертон резонирует целый ряд труб различной длины, причем отношение этих длин к длине волны звука, испускаемого камертоном, составляет $\frac{1}{4}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{5}{4}$ и т. д. Это равносильно тому, что закрытая труба определенной длины резонирует на целый ряд звуков, числа колебаний которых относятся, как числа 1, 3, 5, 7 и т. д. В том же самом § 393 было установлено, что в случае открытой трубы различные длины этих труб, резонирующие на одну и ту же ноту, относятся к длине волны, как числа $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{2}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{4}{2}$ и т. д. Последнее значит, что открытая труба может резонировать на целый ряд нот, частоты которых относятся друг к другу, как числа 1, 2, 3, 4, 5 и т. д. Отсюда следует, что как с открытыми, так и с закрытыми трубами можно получить более высокие звуки, чем основные их тона (т. е. обертоны), и что частота первого обертона открытой трубы должна в два раза превосходить частоту основного тона (т. е. если принять основной тон за до, то первый обертон будет до′); частота второго обертона будет в три раза больше частоты основного тона (т. е. это будет соль′); частота третьего обертона будет в четыре раза больше (т. е. это будет до″), частота четвертого обертона будет в пять раз больше (т. е. это будет ми″) и т. д. В случае же закрытых труб частота первого обертона в три раза превосходит частоту основного тона (т. е. это должен быть соль′), частота второго обертона превосходит ее в пять раз (т. е. это будет ми″) и т. д. Другими словами, в то время как открытые трубы дают все без исключения высшие гармонические составляющие, как четные, так и нечетные, в закрытых трубах получаются только нечетные гармонические составляющие, а четных они совсем не дают.

Будем дуть в трубку на рис. 371, оставив нижний ее конец открытым. Начнем постепенно усиливать силу продуваемой струи. Мы неожиданно получим до′, затем, по мере увеличения силы, с которой продувается струя,

---

[1] Закроем снизу рукой трубу *a* (рис. 371) и дунем в нее. Затем уберем руку и опять дунем в трубу. Вторая нота действительно будет на октаву выше первой.

звук перескочит сначала на с о л ь′, а потом, быть может, даже на д о′. Таким образом, в полном согласии с нашей теорией, открытая труба действительно дает как четные, так и нечетные гармонические составляющие основного тона.

Если же закрыть нижний конец, то первым обертоном окажется с о л ь′, следующим м и′, снова в согласии с требованиями теории в применении к закрытым трубам.

413. Причины возникновения звука в трубах. Продувание воздуха сквозь отверстие трубы вызывает музыкальный звук, потому что при этом в струе воздуха происходят продольные колебания с периодом, который, как мы увидим, определяется частотой резонанса трубы. Предположим, например, что воздушная струя *a* (рис. 372) попадает сначала прямо на внутреннюю стенку трубы у верхнего края. При этом происходит сгущение воздуха, распространяющееся вниз по трубе. Отразившись от закрытого конца трубы, струя возвращается к верхнему отверстию, производя при этом разрежение. Таким образом, воздуху, заполняющему окружающее пространство, сообщаются через правильные промежутки времени импульсы, частота которых определяется резонансной частотой трубы, т. е. ее длиной.

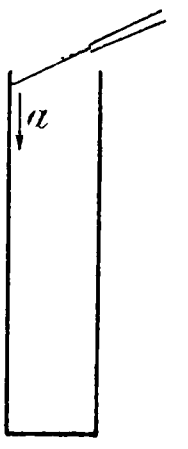


Рис. 372. Колеблющаяся струя воздуха.

Вдувая воздух более энергично, можно благодаря трению о стенки, неожиданно создать у отверстия трубы столь сильное сжатие, что струя будет выброшена из трубы раньше, чем вернется первый отраженный импульс. В этом случае звук получится только тогда, если воздух вдувается с такой силой, что выбрасывание струи будет происходить с частотой, соответствующей одному из обертонов. При этом отраженные импульсы будут приходить от закрытого конца трубы через промежутки времени, которые будут соответствовать указанной частоте. Отсюда следует, что для получения какого-либо обертона вдувание воздушной струи должно производиться с вполне определенной силой.

Можно также представить себе, что труба наполняется воздухом до тех пор, пока давление его внутри трубы не достигает такой величины, когда происходит выбрасывание воздушной струи, за которым следует разрежение, после чего снова происходит сжатие. Частота этих процессов зависит, как указывалось выше, от длины трубы и от силы, с которой производится вдувание воздуха.

Аналогичным же образом обстоит дело и в случае открытых труб, с тем единственным отличием, что здесь отражения сжатий и разрежений от нижнего конца происходят с вдвое меньшей частотой, потому что в открытых трубах длина трубы составляет не четверть длины волны, а половину (см. § 393).

414. Музыкальные инструменты, основанные на колебаниях в воздушной струе. Механизм получения музыкальных звуков в обыкновенной органной трубе, флейте, дудке, всевозможного рода свистках в основных чертах такой же, как и в случае трубы, представленной на рис. 372. Во всех этих инструментах воздушная струя поступает через щель в воздушную камеру, причем отраженные импульсы, приходящие от другого конца камеры, вызывают в струе продольные колебания, начинающиеся в камере и затем выходящие наружу. Таким образом окружающему воздуху сообщается

ряд правильных импульсов, попадающих из инструмента в ухо слушателя, так же как в случае диска, описанного в § 386. Воздушная камера может иметь второй конец открытым или закрытым. Во флейте он открыт, в свистках он обычно закрыт, а в органных трубах он может быть и открыт, и закрыт. На рис. 373 представлен поперечный разрез органной трубы. Колебания происходят в воздушной струе, попадающей через S в щель L, причем они вызываются колебаниями, создаваемыми волнами, отраженными от конца O. Органы снабжаются отдельными трубами для каждой ноты; во флейте же и в дудке, открывая отверстия в трубе или изменяя силу вдувания струи воздуха, можно также получить разные ноты.

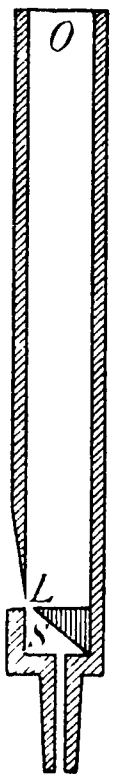


Рис. 373. Органная труба.

415. Язычковые инструменты. В язычковых инструментах колеблющаяся воздушная струя заменена колеблющимся язычком, открывающим и закрывающим через правильные промежутки времени отверстие, сквозь которое музыкант направляет струю воздуха. В кларнете, гобое, фаготе и т. д. язычок помещается в верхнем конце трубы (см. рис. 374); теория действия этих инструментов такая же, как и в случае органной трубы.

416. Инструменты типа корнет-а-пистона. В таких музыкальных инструментах, как охотничий рог или корнет-а-пистон, колебания язычка заменены дрожанием губ исполнителя, причем период этих дрожаний, так же как в органной трубе или в кларнете, зависит от частоты, с которой происходят отражения импульсов. В охотничьем роге труба имеет определенную длину, и в инструменте отсутствуют клапаны; кроме того благодаря малому диаметру трубы роговая музыка богата обертонами.

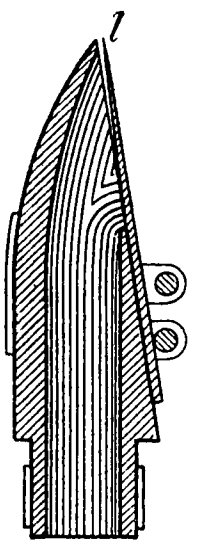


Рис. 374. Мундштук кларнета; виден язычок l, открывающий и закрывающий верхний конец трубки.

417. Фонограф. В первоначальной конструкции фонографа звуковые волны, собранные рупором, направлялись к тонкому металлическому диску C (рис. 377), являющемуся совершенной копией телефонной диафрагмы и точно воспроизводящему колебания падающей на него волны. Эти колебания записываются с помощью острия D, укрепленного на нижней стороне диска на покрытом тонким слоем воска цилиндре M.

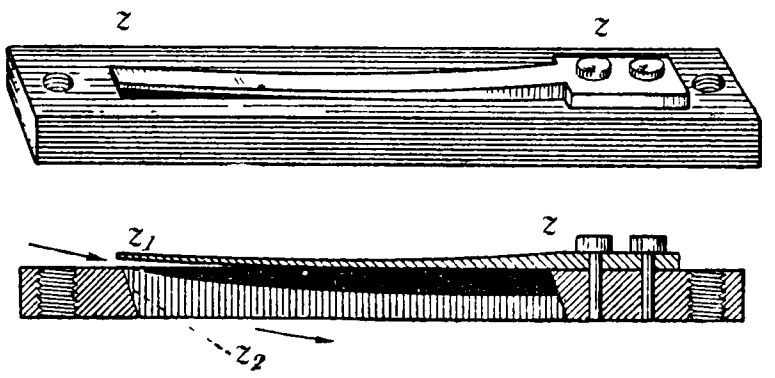


Рис. 375. Колеблющийся язычок губного органчика, аккордиона и пр.

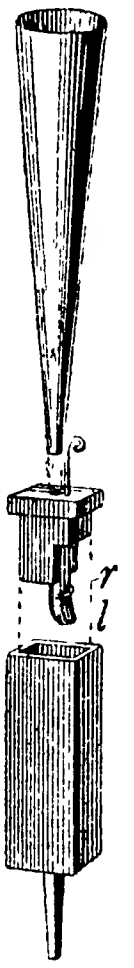


Рис. 376. Язычковая органная труба.

Если острие снова проходит в воске по сделанным им извилинам, то оно опять передает диску записанные на цилиндре колебания.

На этом основано устройство диктофонов и эдифонов, во многих учреждениях и деловых конторах заменяющих стенографисток. Машинистка пишет письма под диктовку такого аппарата. Последний тип фонографа изображен на рисунке стр. 307.

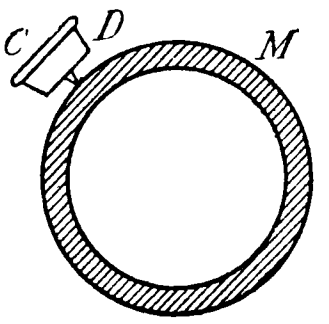


Рис. 377

Резюме. **Длина волны основного тона закрытой трубы в четыре раза превосходит длину трубы; длина волны основного тона открытой трубы в два раза превосходит длину трубы.**

Открытая труба дает как четные, так и нечетные гармонические составляющие основного тона, в то время как закрытая труба дает только нечетные гармонические составляющие.

Вопросы и задачи.[1]

1. Длина открытой органной трубы равна 1 *м*. Какова частота основного тона трубы, если скорость звука равна 346 *м* в секунду?

2. При установке пятиметровой открытой органной трубы в концертном зале оказалось, что потолок слишком низок. Как нужно было бы переделать трубу, не меняя высоты ее тона?

3. Почему тембр открытой органной трубы отличается от тембра закрытой органной трубы?

4. Объясните, каким образом с помощью инструмента в роде охотничьего рога, в котором столб воздуха имеет неизменную длину, можно получить несколько нот различной высоты, как, например, C,G-, C′, E′, G′ (C употребляется редко).

5. Каковы относительные длины органных труб, дающих восемь нот диатонической гаммы?

6. Скорость звука в водороде почти в четыре раза больше, чем в воздухе. Если сквозь трубу для ноты C продувать водород, то какой высоты получится звук?

7. Почему высота звука, получаемого в фонографе, возрастает при увеличении скорости вращения диска?

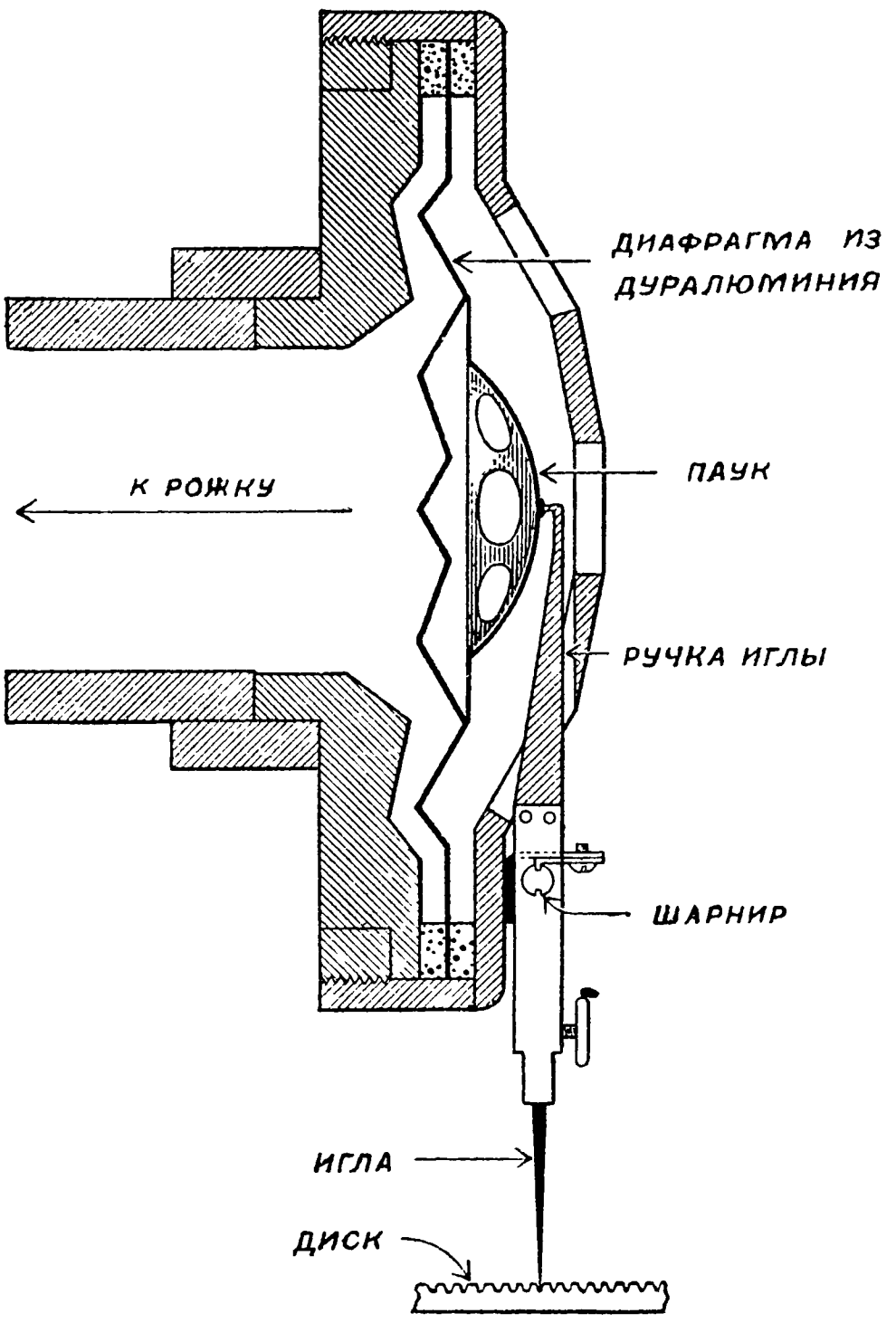
8. Назовите два музыкальных инструмента, в которых для усиления звука в первом применяется явление резонанса, а во втором вынужденные колебания.

9. Каким образом можно доказать, что музыкальный звук распространяется в виде волнового движения?

10. Какие доказательства мы имеем в пользу того, что звуковые волны представляют собой продольные колебания?

---

[1] Дополнительные вопросы и задачи к главе XVII помещены в приложении.



ФОНОГРАФ - РЕПРОДУКТОР.

Необычная форма изображенной здесь диафрагмы должна исключить все естественные частоты, характерные для диафрагмы, и таким образом получить по возможности наименее искаженную репродукцию пришедших волн. Волна попадает на диск микрофона, вполне аналогичного микрофонам, употребляемым в радиопередачах, и так же тщательно изготовленного для избежания искажения. Изменения давления воздуха, давящего на эту диафрагму, превращаются микрофоном в колебания тока, а эти токи, после усиления в неискажающем вакуумном усилителе, оказывают магнитное действие на иголку, в роде изображенной на рисунке; иголка эта чертит свой волнообразный путь по мягкому воску, а с этого пути снимается медный электротип и затем этот волнообразный след переводится с медной пластины на диски с помощью гидравлической силы в 5—10 тонн, пока диски эти еще достаточно горячи, чтобы на них отпечатался след. На рисунке видно, как игла репродуктора следует по волнообразному пути и в свою очередь образует волны в воздухе, соприкасающемся с диафрагмой.

ГЛАВА XVIII.

ПРИРОДА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА.

418. Скорость света. До 1675 г. предполагалось, что свет от источника до наблюдателя распространяется мгновенно. Однако в 1675 г. Олаф Рёмер, молодой датский астроном, сделал следующее наблюдение. Он точно заметил время, когда спутник Юпитера *M* (рис. 378) вступил в тень Юпитера, причем Земля находилась в точке *E* своей орбиты; зная среднее значение промежутка времени между двумя затмениями спутника Юпитера, он предсказал время такого затмения, которое должно было произойти через шесть месяцев, когда Земля перейдет в E^1. На самом же деле затмение произошло с опозданием на 16 минут 36 секунд (996 секунд). Реймер сделал отсюда вывод, что эти 996 секунд опоздания представляют собой промежуток времени, в течение которого свет пересекает земную орбиту, т. е. проходит расстояние около 300 000 000 *км*. Наиболее точные из современных определений скорости света выполняются лабораторными методами. Общепринятым является найденное Майкельсоном значение, равное 299 860 *км/сек*. Достаточно запомнить в круглых числах величину 300 000 *км/сек*. Хотя эта скорость такова, что световой луч в течение секунды огибает землю $7^1/_2$ раз, однако междузвездные расстояния столь огромны, что свет, приходящий на землю от ближайшей неподвижной звезды — альфа Центавра — вышел оттуда 4,3 года тому назад. Если бы наблюдатель на Полярной звезде обладал бы достаточно мощным телескопом, который позволил бы ему рассматривать события на Земле, то он увидел бы сражение на Марне не раньше 1969 г. Расстояния до некоторых спиральных туманностей недавно были измерены Е. П. Хаббл ем в обсерватории на горе Уилсон (Калифорния); эти расстояния столь огромны, что свет от туманностей, который мы сейчас видим, вышел оттуда миллион лет тому назад.

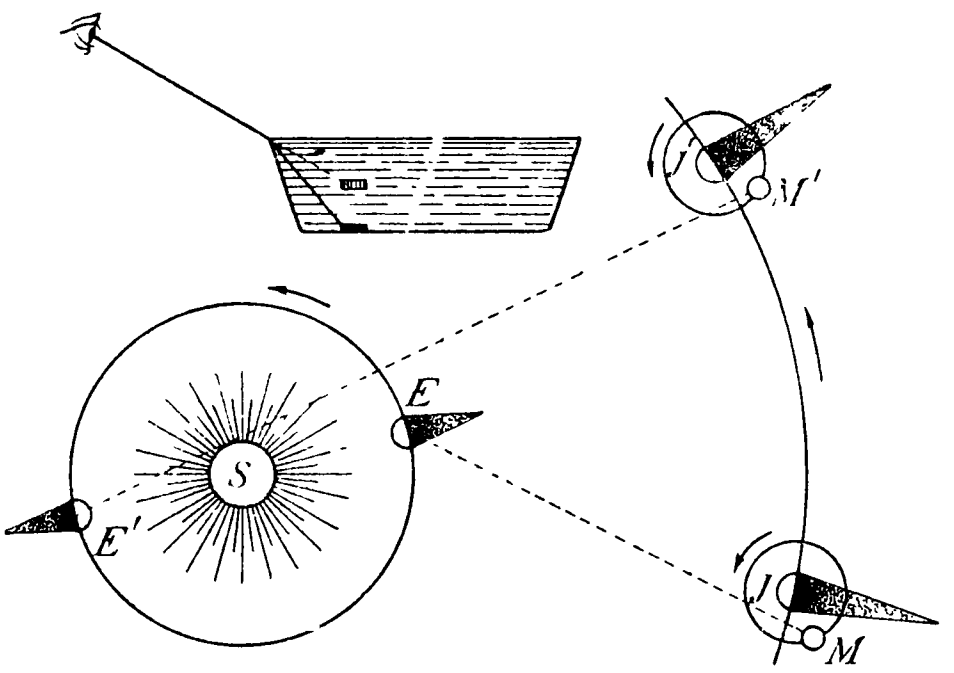


Рис. 378. Определение скорости света по способу Земера.

Фуко во Франции и Майкельсон в Америке непосредственно измерили скорость света в воде и нашли, что она составляет только три четверти скорости в воздухе. Дальше будет показано, что во всех прозрачных жидкостях и твердых телах она меньше, чем в воздухе.

419. Отражение света. Впустим в затемненную комнату через узкую щель пучок солнечного света. О прямолинейном распространении пучка можно судить по освещаемому им столбу взвешенных в воздухе пылинок. Пусть пучок падает на поверхность зеркала. При этом направление его резко изменится, как показано на рис. 379. Поместим зеркало перпендикулярно к пучку. Пучок отразится навстречу самому себе. Повернем теперь зеркало на 45°. Отраженный пучок составит прямой угол с падающим.

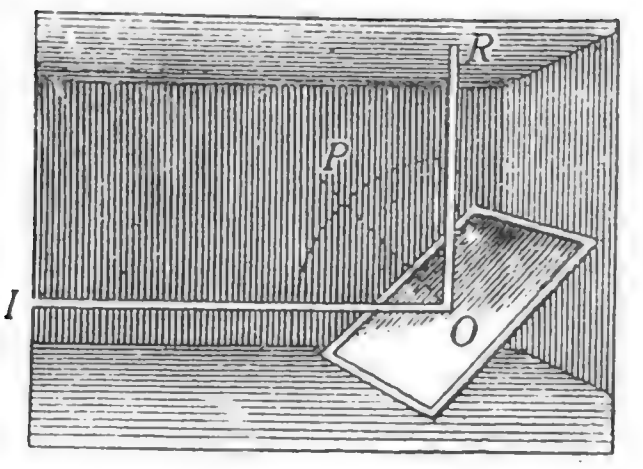


Рис. 379. Иллюстрация закона отражения света.

Опыт этот грубо показывает, что угол IOP между падающим пучком и нормалью к зеркалу равен углу POR между этой нормалью и отраженным пучком. Первый угол IOP называется углом падения, а второй угол POR—углом отражения. У г о л п а д е н и я р а в е н у г л у о т р а ж е н и я.

420. Рассеяние света. В предыдущем опыте свет отражался от весьма гладкой плоской поверхности. Заставим теперь пучок света падать на неровную поверхность, например, на лист неглазированной белой бумаги. Мы не увидим отраженного пучка; но вместо этого вся комната немного осветится, так что можно будет ясно различить очертания всех предметов, которые до того были невидимы.

Пучок света, очевидно, рассеивается по всем направлениям бесчисленным количеством небольших отражающих участков, из которых состоит поверхность бумаги. Явление это проявится еще более резко, если направить пучок сначала на кусок черной материи, а потом на лист белой бумаги. Свет сильно поглощается черной материей, в то время как бумага его рассеивает или д и ф ф у з н о о т р а ж а е т. Освещение, вполне достаточное для шитья из белого материала, может оказаться слишком слабым при работе с черной материей. Различие между гладкой отражающей поверхностью и неровной представлено в сильно увеличенном виде на рис. 380. Стены в узких дворах больших домов должны быть выкрашены в белый цвет для получения наибольшего диффузного рассеяния дневного света, так как в противном случае в комнатах, выходящих окнами во двор, будет слишком темно.

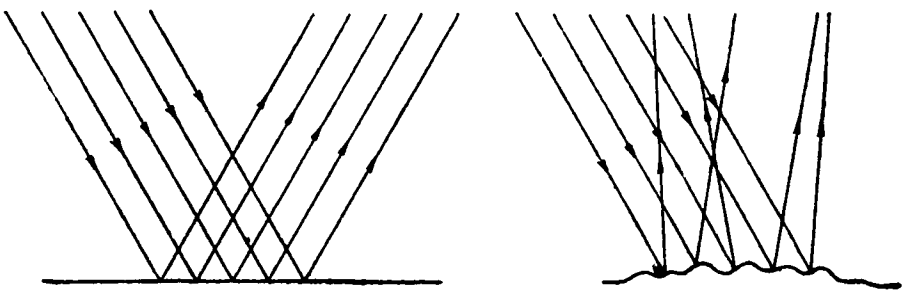


Рис. 380. Правильное и неправильное отражение.

421. Каким образом мы видим несветящиеся тела. Всем хорошо известно существование целого ряда таких тел, как Солнце, газовое пламя и т. д., которые сами светятся и благодаря тому могут быть различаемы; что же касается других тел, как, например, книг, стульев, столов и т. д., то их можно увидеть только в том случае, если они находятся в присутствии светящихся тел. Предыдущий опыт объясняет, каким образом подобные несветящиеся, рассеивающие свет тела становятся видимыми в присутствии светящихся тел. Дело в том, что поверхность такого рода тел рассеивает по всем направлениям падающий на нее свет; каждый небольшой кусочек такой по-

верхности посылает свет по самым различным направлениям почти так же, как каждая точка светящейся поверхности, испускающая свет по всем направлениям. Благодаря этому мы отовсюду видим о ч е р т а н и я рассеивающей поверхности, подобно тому как мы различаем контуры поверхности, испускающей свет. С другой стороны, если в наш глаз попадает свет от полированной отражающей поверхности, то благодаря тому, что при отражении пучок совершенно не искажается, мы видим очертание не зеркала, а только источника света, независимо от того, светится ли этот источник сам, или нет. Все тела — кроме тех, которые светятся сами, — становятся видимыми только благодаря рассеиваемому ими свету. Черные тела поглощают весь падающий на них свет, но мы все-таки различаем их, так как они выделяются на окружающем их более светлом фоне. Таким образом, можно считать, что всякий в и д и м ы й предмет сам посылает световые лучи, т. е. его можно принимать за светящееся тело.

422. Тени. Поднесем какой-нибудь непрозрачный предмет на очень близкое расстояние к белому экрану, помещенному против окна или широкого газового пламени. До тех пор пока предмет находится вблизи экрана, тень его равномерно темная, но по мере приближения его к источнику света (*F*, рис. 381) в тени можно различить две части: очень темную часть *cd* в середине, куда совершенно не попадает свет от источника, и часть *ec* и *df*, которая с возрастанием расстояния от темного центра *cd* становится все светлее

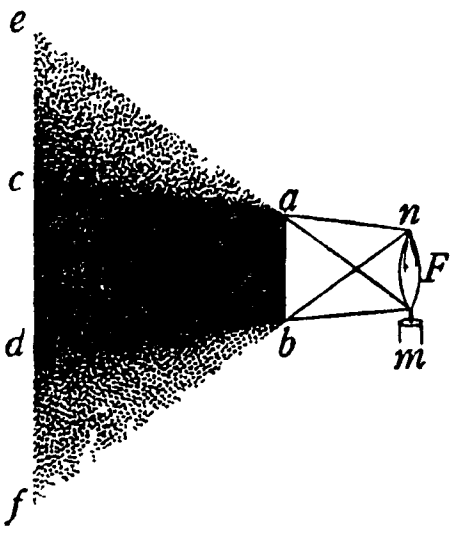


Рис. 381. Тень от широкого источника света.

Явления эти легко объясняются на основе представления о прямолинейном распространении света. Область *abdc*, куда совершенно не проникает свет ни от одной точки источника *mn*, называется т е н ь ю. Области *ace* и *bdf*, получающие свет не от всего источника, а от некоторых его частей, называются п о л у т е н ь ю. Из рисунка ясно видно, что область, занимаемая п о л у т е н ь ю, должна уменьшаться при приближении предмета к экрану, а также при умень-

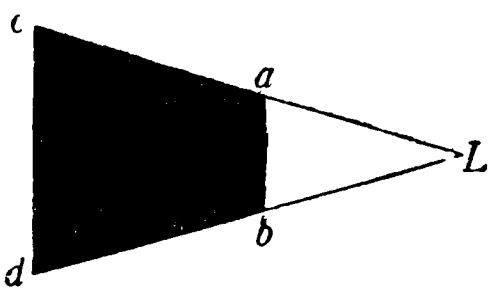


Рис. 382. Тень от небольшого источника.

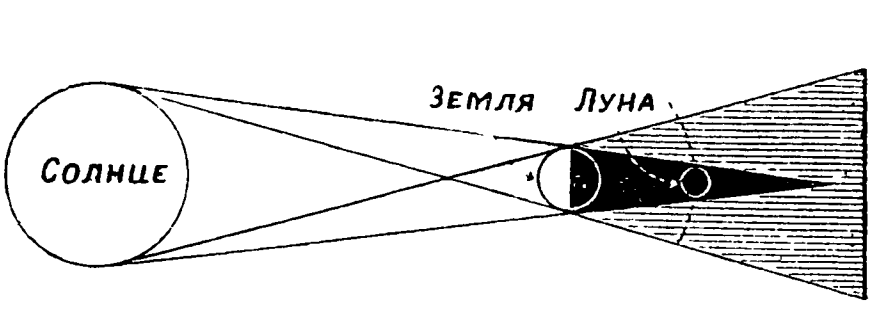


Рис. 383. Иллюстрация полного затмения Луны, попадающей в тень Земли.

шении размеров источника света. В случае точечного источника света полутень совершенно отсутствует (рис. 382). Если же источник света по своим размерам больше непрозрачного предмета, как в случае Солнца и Земли, то полутень представляет собою конус, как и показано на рис. 383.

Резюме. **Скорость света равняется 300 000 *км* в секунду.**
Угол отражения равен углу падения.
Рассеяние света представляет собой беспорядочное отражение.
Несветящиеся тела становятся видимыми благодаря рассеиваемому ими свету. Поверхность, которая отражала бы все лучи, была бы невидима.

Вопросы и задачи.

1. Одна из самых ярких звезд, Сириус, находится на расстоянии более чем 80 000 000 000 000 *км*. Если бы эта звезда внезапно исчезла, то как долго продолжала бы она светиться для нас?
2. Укажите, с помощью какого расположения зеркал вы сможете увидеть происходящее за высокой каменной стеной или в защищенном валом окопе. Такое устройство явится простейшим видом перископа.
3. Почему комната, оклеенная белыми обоями, значительно светлее такой же комнаты, но оклеенной черными обоями?
4. Сравните отражение света от белой фильтровальной бумаги с отражением от плоского зеркала. Какой из этих предметов легче обнаружить на расстоянии? Почему?
5. Сделайте чертеж, изображающий относительные положения Земли, Солнца и Луны во время полного лунного затмения; нарисуйте земную тень и обозначьте точкой положение наблюдателя.
6. Способом, указанным в вопросе 5, объясните, как происходит полное солнечное затмение. Объясните также частное солнечное затмение.
7. Может ли Луна произвести одновременное затмение Солнца для всей земной поверхности?

ОСВЕЩЕНИЕ И ФОТОМЕТРИЯ.

423. Сила света. Поставим четыре свечи вплотную друг к другу таким образом, чтобы они отбрасывали на находящийся в хорошо затемненной комнате экран *C* тень от непрозрачного предмета *O* (рис. 384). Поместим теперь пятую свечу так, чтобы она отбрасывала на экран другую тень от предмета *O*. Так как свет от *A* падает на тень, отбрасываемую *B*, а свет от *B* — на тень, отбрасываемую *A*, то, очевидно, обе тени покажутся одинаково темными только в том случае, если на каждую из них будет падать одинаково сильный свет, т. е. если *A* и *B* произведут на экране одинаковое освещение. Передвигая *A* и *B* добьемся того, чтобы условие это было выполнено, и измерим расстояния от *C* до *A* и *B*. Если пламя всех пяти свечей имеет одинаковую величину, то первое расстояние окажется ровно в два раза больше второго. Следовательно, сила света, падающего на экран от каждой из свечей *B*, составляет одну четверть силы света, падающего на экран от свечи *A*, которая находится на вдвое меньшем расстоянии.

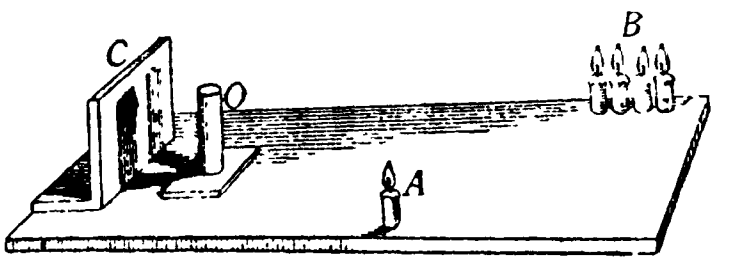


Рис. 384. Фотометр Румфорда.

Опыт этот непосредственно показывает, что сила света изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от источника.

Действительно, из рис. 385 следует, что так как свет от свечи *L* достигнув *B*, освещает теперь в четыре раза большую поверхность. чем в том случае, когда он освещал площадку *A*, а в *C* он распространяется на поверхность в девять раз большую, причем расстояние от источника света до *B* — больше в два раза, а до *C* — больше в три раза расстояния от источника до *A*, то, очевидно, силы света в *B* и *C*

составляют только одну четверть и соответственно одну девятую силы света в A.

Этот способ сравнения силы света двух различных источников был впервые применен графом Румфордом. Поэтому весь прибор называется фотометром Румфорда.

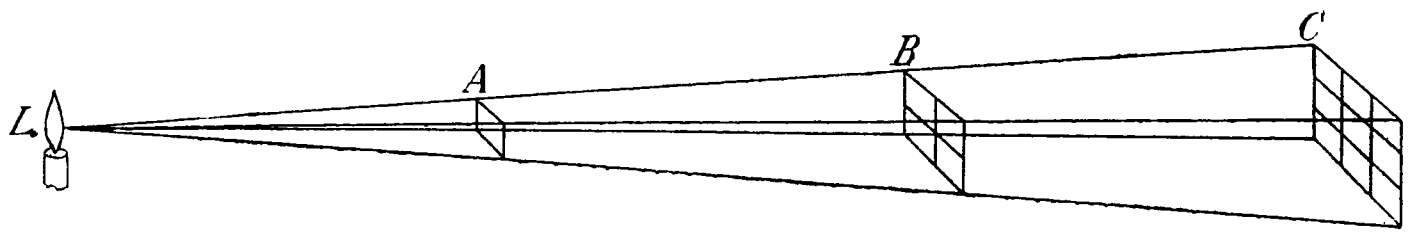


Рис. 385. Доказательство закона обратных квадратов.

424. Единица силы света и освещенности. Последний опыт позволяет найти метод для сравнения силы света различных источников; так, например, предположим, что четыре свечи B заменены газовым пламенем и что условие равной освещенности экрана выполняется при тех же расстояниях BC и AC, как и раньше, т. е. одно расстояние в два раза больше другого. Мы заключаем отсюда, что газовое пламя, создающее на расстоянии двух метров такую же освещенность, как одна свеча на расстоянии метра, обладает силой света четырех свечей.

Вообще, сила света любых двух источников, создающих одинаковую освещенность определенного экрана, прямо пропорциональна квадратам расстояний этих источников от экрана.

Обычно принято силу света всех световых источников выражать в так называемых «свечах». Так, например, весьма распространенная единица силы света — «английская свеча» — представляет собой спермацетовую свечу толщиною в 2 *см*; она сжигает 7,776 *г* спермацета в час. Сила света обыкновенной газовой горелки, сжигающей около 0,14 *куб. м* газа в час, составляет от 16 до 25 английских свечей в зависимости от качества газа.

Образцовая свеча создает на расстоянии 1 *м* освещенность, которая принимается за единицу освещенности и называется люксом. Так, например, лампа в 100 свечей дает на расстоянии 1 *м* освещенность в 100 люксов, на расстоянии 2 *м* — в 25 люксов, на расстоянии 5 *м* — 4 люкса и на расстоянии 10 *м* — 1 люкс. Вообще люксы $= \frac{\text{число свечей}}{\text{метры}^2}$. Обычно в комнатном освещении мы не наблюдаем такого падения освещенности благодаря рассеянию света стенами.

425. Фотометр Бунзена. С помощью капли масла или расплавленного парафина сделаем на листе неглазированной матовой белой бумаги полупрозрачное пятно. Поднесем затем бумагу к окну и поместим ее между собою и окном. Промасленное пятно покажется нам светлее всей остальной бумаги. Затем будем рассматривать бумагу со стороны окна. Масляное пятно окажется темнее остальной бумаги. Отсюда мы заключаем, что при рассматривании бумаги со стороны большей освещенности масляное пятно кажется темным; наоборот, если смотреть на него со стороны меньшей осве-

щенности, то масляное пятно кажется светлым. Если же обе стороны бумаги освещены одинаково, то яркость пятна будет одна и та же, с какой бы стороны его ни рассматривать. Затемним комнату и поместим промасленную бумагу между двумя газовыми горелками, двумя электрическими лампочками или какими-либо другими двумя одинаковыми источниками света. Легко заметить, что при приближении бумаги к одному из них пятно кажется темным, если смотреть на него со стороны того источника света, к которому оно ближе; однако, если передвигать бумагу по направлению к другому источнику света, то при рассматривании с той же самой стороны пятно из темного станет светлым. Всегда можно найти для промасленной бумаги такое положение, в котором пятно совершенно исчезает или по крайней мере остается без изменений при рассматривании его с обеих сторон. В этом положении освещенность от обоих источников света одинакова. Поэтому, для того чтобы найти силу света неизвестного источника, достаточно поставить с одной стороны стандартную свечу, а с другой стороны — неизвестный источник, как на рис. 386, и затем привести A в положение одинаковой освещенности с обеих сторон. Сила света неизвестного источника, находящегося в C, будет равна частному от деления квадрата расстояния CA на квадрат расстояния BA.

Прибор этот известен под названием фотометра Бунзена.

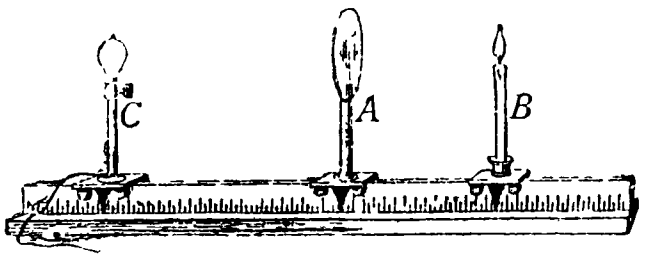


Рис. 386. Фотометр Бунзена.

Резюме. **Сила света изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от его источника.**

Сила света каких-либо двух источников, производящих одинаковую освещенность данного экрана, прямо пропорциональна квадратам расстояний от этих источников света до экрана.

Люкс представляет собой освещенность, создаваемую единицей силы света на расстоянии одного метра.

Вопросы и задачи.

1. Укажите разницу между силой света источника и освещенностью. В каких единицах измеряется каждая величина?

2. Если бы Солнце находилось от Земли на таком же расстоянии, как Луна, то во сколько раз сильнее был бы солнечный свет? (Расстояние от Земли до Луны 395 000 *км* и до Солнца 120 000 000 *км*.)

3. Если при печатании фотографических негативов на расстоянии 12 *см* от газовой лампы достаточна экспозиция продолжительностью в 20 сек., то какая экспозиция потребуется для печатания того же самого негатива на расстоянии 24 *см* от той же лампы?

4. Если на расстоянии 15 *см* от электрической лампочки силою света в 8 свечей достаточна экспозиция продолжительностью в 20 секунд, то какая экспозиция потребуется на расстоянии 30 *см* от электрической лампочки силою света в 32 свечи?

5. Если для чтения достаточно освещенности в 40 люксов, то на каком расстоянии от страницы книги нужно поместить источник света силою в 16 свечей, для того чтобы получить указанную освещенность?

6. Стандартная свеча дает на расстоянии 2 *см* на экране ту же самую освещенность, как и другой источник света на расстоянии 8 *м*. 1) Какова сила света второго источника? 2) Какое количество люксов дает на указанных расстояниях каждый из источников в отдельности?

7. Если газовое пламя, находящееся на расстоянии 300 *см* от экрана в фотометре Румфорда, и стандартная свеча, находящаяся на расстоянии 50 *см*, дают тень одинаковой освещенности, то каким количеством свечей выражается сила света газового пламени?

8. Где больше коэффициент полезного действия: в лампе, потребляющей 1,3 ватта на свечу или 1,5 ватта на свечу? Почему?

ВОЛНОВАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА.

426. Корпускулярная теория света. Все рассмотренные нами до сих пор свойства света, пожалуй, легче всего объяснить с помощью гипотезы, предполагающей, что свет представляет собой поток мельчайших частиц, или корпускул, выбрасываемых с огромной скоростью в 300 000 *км/сек*. всеми светящимися телами. Явления прямолинейного распространения и отражения света и происходят таким образом, как если бы свет обладал корпускулярной природой. Явление преломления эта гипотеза также позволяет объяснить, хотя уже и не столь простым образом. Теория эта, известная под названием корпускулярной, являлась общепринятой вплоть до 1800 г.

427. Волновая теория света. С точки зрения другой гипотезы, впервые с полной отчетливостью формулированной великим голландским физиком Гюйгенсом (1629 — 1695), свет, подобно звуку, рассматривался как особый вид волнового движения. Эта гипотеза встретилась с самого начала с двумя очень серьезными затруднениями. Во-первых, свет, в отличие от звука, не только распространяется без всяких трудностей сквозь наилучший вакуум, который может быть получен с помощью воздушного насоса, но он проходит, повидимому, без всякого труда через огромные междузвездные пространства, где господствует, по всей вероятности, во много раз лучшая пустота, чем тот вакуум, который может быть создан лабораторными средствами. Таким образом, если свет представляет собой волновое движение, то это движение должно происходить в какой-то среде, которая заполняет все пространство и вместе с тем не препятствует движению звезд и планет. Гюйгенс предположил, что такая среда существует, и назвал ее эфиром.

Вторым затруднением, встретившимся на пути волновой теории, являлось то, что она потерпела сначала неудачу при объяснении явления прямолинейного распространения света. Звуковые волны, волны на поверхности воды и все другие виды волн, с которыми мы больше всего привыкли иметь дело, огибают препятствия, встречающиеся на пути их распространения, в то время как световые волны ведут себя как будто иначе. Это затруднение главным образом и побудило многих знаменитых естествоиспытателей того времени, в том числе и великого Исаака Ньютона, отбросить волновую теорию и перейти на сторону корпускулярной теории. Однако более ста лет тому назад затруднение это полностью было устранено, и, кроме того, был открыт целый ряд других свойств света, которые могли получить удовлетворительное объяснение и истолкование только на основе волновой теории. Самое важное из этих свойств мы рассмотрим в следующем параграфе.

428. Интерференция света. Сложив вместе две стеклянные пластинки около 1,5 *см* толщиной и 10 или 12 *см* длиной, вложим между ними на одном конце тонкий листок бумаги, как показано на рис. 387, а другой конец крепко зажмем, вследствие чего между пластинками останется очень тонкий слой воздуха. Погрузим затем кусок асбеста или фильтровальной бумаги в раствор поваренной соли (хлористого натрия) и введем его в пламя

Бунзеновской горелки. Благодаря присутствию натрия пламя окрасится в яркий желтый цвет. Если посмотреть на отражение пламени в стекле, то можно будет видеть ряд тонких черных и желтых линий, пересекающих пластинку.

Волновая теория предлагает следующее объяснение этого явления. Каждая точка пламени посылает световые волны, проходящие сквозь стеклянную пластинку и частью отражающиеся, а частью проходящие сквозь все стекло, т. е. сквозь поверхности $A'B'$, AB, CD и $C'D'$ (рис. 387). Мы рассмотрим, однако, только те отражения, которые происходят от стеклянных поверхностей, соприкасающихся с воздушной прослойкой, т. е. от AB и CD. Изобразим на рис. 388 в большом увеличении разрез этих поверхностей. Пусть сплошная волнистая линия as изображает световую волну, отраженную от поверхности AB в точке a и возвращающуюся отсюда к глазу наблюдателя. Пусть пунктирная волнистая линия ir изображает световую волну, отразившуюся от поверхности CD в точке i и затем возвращающуюся к глазу наблюдателя. Пусть, далее, все сплошные волнистые линии на рисунке изображают световые волны, отразившиеся от различных точек плоскости AB и возвращающиеся к глазу наблюдателя, а все пунктирные волнистые линии — волны, отразившиеся от соответствующих точек плоскости CD. Подобно тому как в опыте со звуковыми биениями мы нашли, что при наложении друг на друга двух последовательных звуковых волн от двух камертонов получается в определенных случаях отсутствие звука, а в других случаях — его усиление (см. § 396), точно так же и в этом опыте два ряда световых волн, отразившихся от плоскостей AB и CD, налагаясь друг на друга, интерферируют друг с другом, причем получается темнота в тех случаях, когда налагаются друг на друга участки волны, соответствующие противоположным движениям светоносной среды. Таким образом, темные полосы в нашем опыте представляют собой попросту места, в которых два пучка, отразившиеся от поверхностей, ограничивающих воздушную прослойку, гасят друг друга, в то время как светлые полосы соответствуют тем местам, где оба пучка усиливают друг друга и создают, следовательно, вдвое сильное освещение. Положение второй темной полосы должно, конечно, определяться тем, что расстояние от c до k и обратно (см. рис. 398) на целую длину волны больше рас-

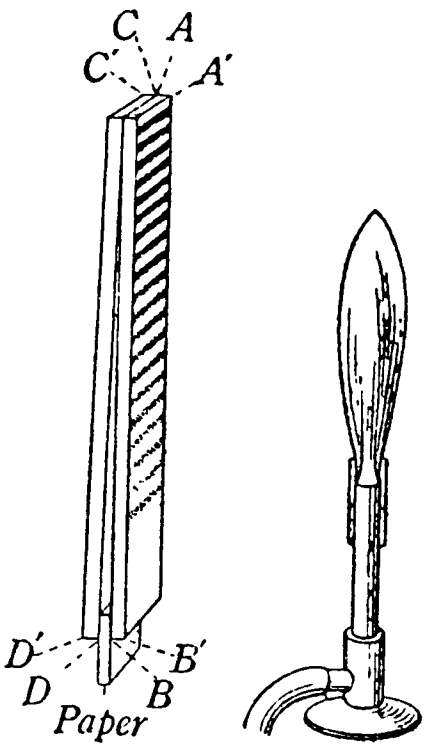


Рис. 387. Интерференция световых волн.

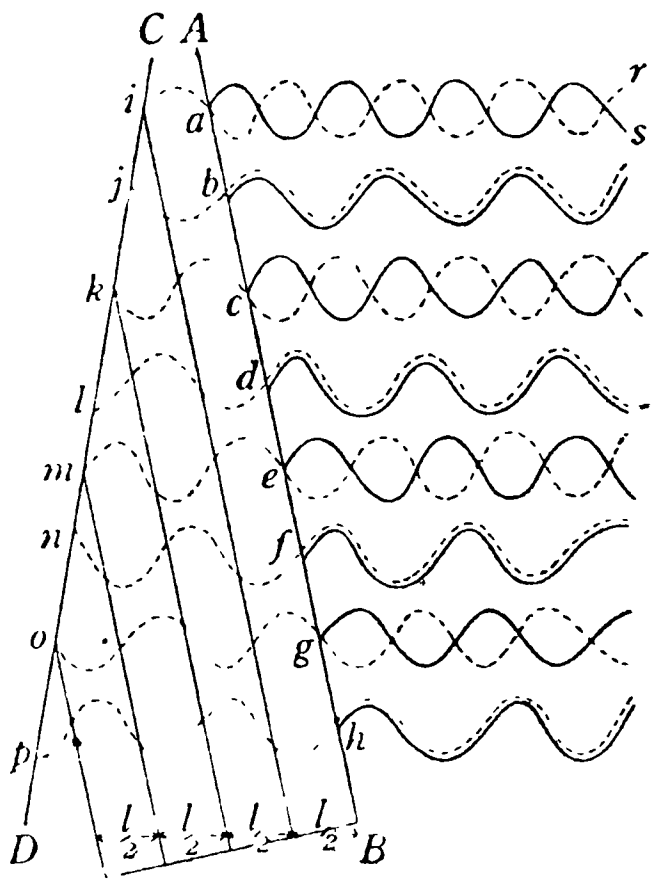


Рис. 388. Объяснение образования темных и светлых полос интерференцией.

стояния от a до i и обратно и т. д. Явление интерференции света встречается в самых различных видах, и в каждом случае волновая теория сразу же позволяет предложить вполне удовлетворительное объяснение наблюдаемых явлений. С другой стороны, корпускулярная теория не в состоянии объяснить ни одного из явлений, связанных с интеференцией света. Поэтому корпускулярная теория в ее первоначальном виде в настоящее время практически оставлена. Впрочем, ряд новых недавно открытых явлений (фотоэлектрический эффект и др.) находит более простое истолкование с точки зрения несколько измененной корпускулярной теории, чем с точки зрения волновой теории. Однако для понимания наиболее резко бросающихся в глаза свойств света все-таки необходимо и, вероятно, и в будущем будет столь же необходимо, пользоваться волновыми представлениями. Действительно, мы с полной определенностью можем утверждать, что световые волны во всем совершенно подобны радиотелеграфным волнам с тем единственным исключением, что они значительно короче последних.

429. Эфир. Мы уже указали, что, становясь на точку зрения волновой теории, необходимо представить себе вместе с Гюйгенсом, что все мировое пространство наполнено светоносной средой. Среда эта не может быть похожа ни на какой обычный вид материи, потому что если бы какая-нибудь материя заполняла межпланетное пространство, то движения планет и других небесных тел неизбежно бы замедлялись. Между тем, за те несколько столетий, в течение которых астрономы производили точные наблюдения над движениями небесных тел, подобные замедления ни разу еще не были обнаружены. Следовательно, среда, сквозь которую распространяется свет, должна обладать плотностью, которая бесконечно мала по сравнению с плотностью наших самых легких газов.

Далее, для того чтобы объяснить прохождение света сквозь прозрачные тела, необходимо предположить, что эфир заполняет не только междузвездные пространства, но также проникает и во внутримолекулярное пространство.

430. Длина волны желтого света. Хотя свет подобно звуку представляет собою вид волнового движения, однако световые волны отличаются от звуковых во многих весьма важных отношениях. Прежде всего, предыдущий опыт, позволивший весьма убедительно удостовериться в справедливости волновой теории, показывает, что длины световых волн чрезвычайно малы по сравнению с длинами обыкновенных звуковых волн. Длина волны желтого света, которым мы пользовались в этом опыте, составляет 0,00006 *см*.

Для того чтобы найти число колебаний в секунду для световых волн, необходимо, так же как и в случае звука, разделить скорость распространения на длину волны. Так как скорость света равна $3{,}10^{10}$ *см/сек.*, а длина волны — 0,00006 *см*, то, следовательно, для желтого света число колебаний в секунду выражается огромным числом, равным $5{,}10^{14}$.

431. Поперечный характер световых волн. Таким образом, мы нашли два различия между световыми волнами и звуковыми, а именно: первые представляют собою возмущения в эфире и распространяются с огромной скоростью, которая в пустоте составляет 300 000 *км/сек.*, в то время как последние представляют собой возмущения в обыкновенной материи и проходят в секунду около 340 *м*

в воздухе и в несколько раз большее расстояние в жидкостях и твердых телах. Существует, однако, коренное различие, которое следует из важного открытия, сделанного Гюйгенсом в 1690 г. Дело в следующем: в то время как звуковые волны образованы, как мы только что видели, продольными колебаниями частиц той среды, сквозь которую они распространяются, т. е. колебаниями, происходящими взад и вперед в направлении распространения волны, световые волны похожи на водяные волны (рис. 352 стр. 284) в том отношении, что они образованы поперечными колебаниями, т. е. колебаниями среды, происходящими перпендикулярно к направлению распространения.

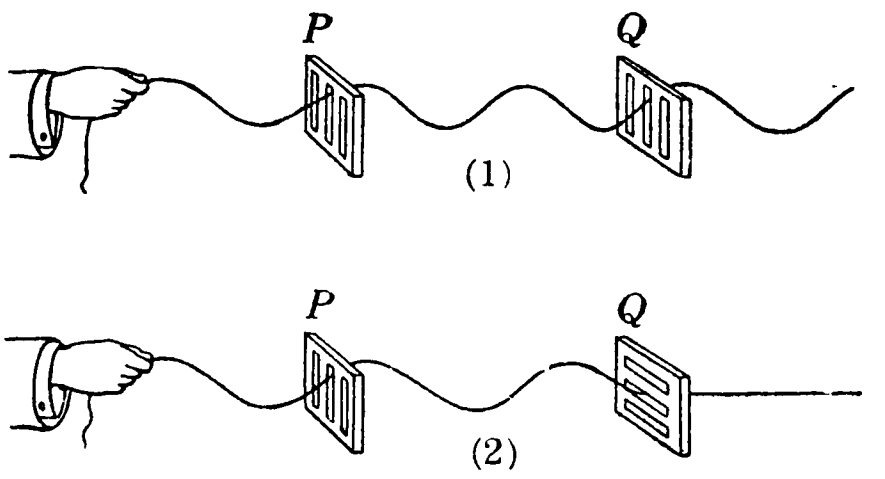


Рис. 389. Прохождение поперечных волн, проходящих сквозь щели.

Для уяснения разницы между поведением этих двух видов волн в различных условиях рассмотрим прохождение поперечных волн, созданных в веревке, через две решетки, расположенных одна за другой, как показано на рис. 389. До тех пор пока щели в обеих решетках параллельны той плоскости, в которой происходит колебательное движение руки (см. рис. 389, 1), волны могут проходить через них без всяких затруднений; однако, если щели в первой решетке P параллельны направлению, в котором происходят колебания, а во второй решетке Q поставлены перпендикулярно к этому направлению (как на рис. 389,2), то ясно, что волны пройдут без труда сквозь P, но будут задержаны решеткой Q, как это и показано на рисунке. Другими словами, только те колебания могут пройти сквозь решетки P и Q, которые происходят параллельно щелям этих решеток.

Если же, с другой стороны, такая решетка находится на пути не поперечной, а продольной, например, звуковой волны, то, очевидно, последняя пройдет сквозь решетку в любом ее положении.

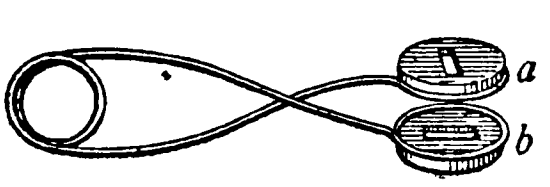


Рис. 390. Турмалиновые щипцы.

Как показывает опыт, два кристалла турмалина ведут себя по отношению к световым волнам точно так же, как две решетки по отношению к волнам, созданным в веревке.

Поместим такой кристалл a (рис. 390) между глазом и источником света. Свет будет сквозь него проходить, хотя интенсивность его при этом несколько уменьшится. Затем расположим другой кристалл b на одной прямой с первым. Свет будет продолжать проходить сквозь оба кристалла, при том условии, что их кристаллические оси параллельны, как показано на рис. 391. Если же повернуть один кристалл в его плоскости на 90°, то свет перестанет проходить. Отсюда следует, что кристалл турмалина пропускает только такие световые волны, в которых колебания происходят в одной определенной плоскости.

Опыт этот приводит к неизбежному заключению, что световые волны представляют собой поперечные,

а не продольные колебания. Описанный опыт является демонстрацией явления, известного под названием поляризации света; пучок света, который, пройдя сквозь a, не может пройти сквозь b, если оси a и b скрещены, называется поляризованным пучком. Таким образом, заключение о поперечном характере световых волн основывается на явлении поляризации света.

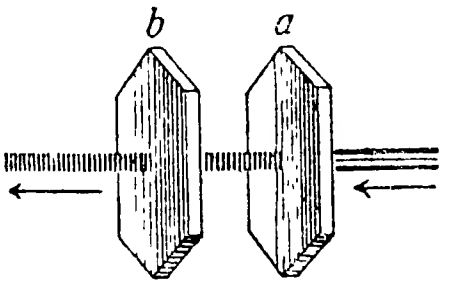


Рис. 391. Свет проходит сквозь кристаллы турмалина.

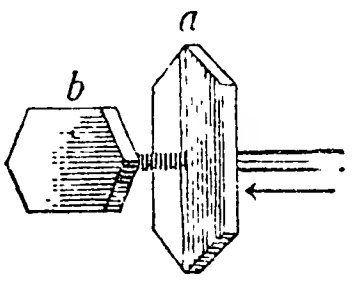


Рис. 392. Свет не проходит сквозь скрещенные кристаллы турмалина.

Резюме. **Явления интерференции указывают, что свет представляет собой волновое движение. Явления поляризации указывают на поперечный характер световых волн.**

Вопросы и задачи.

1. Приведите наиболее убедительные известные вам опытные данные, подтверждающие волновую теорию света.
2. В каком отношении световые волны отличаются от звуковых волн?
3. Приведите опытные данные, доказывающие поперечный характер световых волн.
4. Если длина волн, испускаемых какой-то зеленой лентой, равна 0,00005 *см*, то сколько волн в секунду посылает эта лента в наш глаз?

ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА.

432. Преломление. Пусть узкий пучок солнечного света падает на толстую прямоугольную стеклянную пластинку, верхняя плоскость которой отшлифована, а нижняя — сделана матовой (рис. 393). Мы увидим, что часть пучка отразится, а часть пройдет сквозь пластинку. При этом окажется, что часть пучка, прошедшая сквозь стекло, отклонится по направлению к перпендикуляру OP, входящему в стекло. Достигнув границы с воздухом,

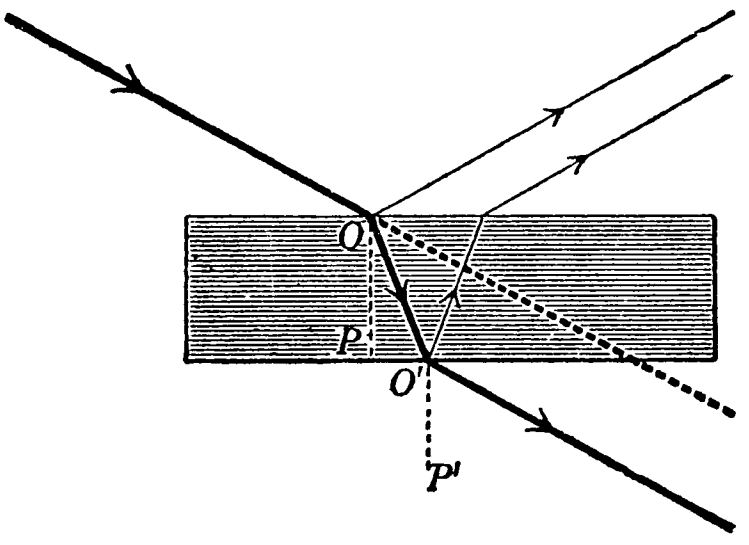


Рис. 393. Путь светового луча сквозь среду, ограниченную параллельными плоскостями.

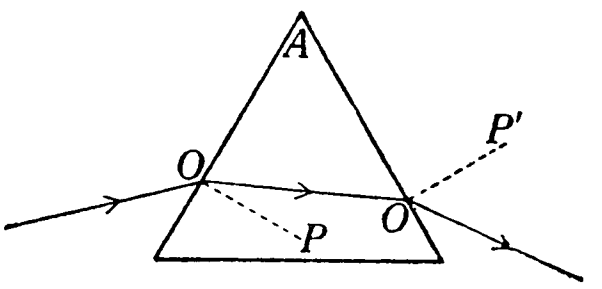


Рис. 394. Путь светового луча сквозь призму.

пучок снова разобьется на две части — отраженную и вышедшую наружу, однако теперь пучок, выйдя наружу, отклонится в сторону от перпендикуляра $O'P'$, выходящего из стекла. Заставим пучок света падать на поверхность стекла под разными углами. При этом окажется, что чем больше угол падения, тем больше и отклонение, испытываемое пучком. При падении под прямым углом отклонение исчезает. Если верхняя и нижняя поверхность стекла параллельны, то пучок отклонится, проходя через каждую из поверхностей,

на один и тот же угол, но в разных направлениях, в результате чего выходящий пучок будет параллелен падающему.

Пусть, как и прежде, узкий пучок солнечного света падает на стеклянную призму, вырезанную из толстой стеклянной пластины. Путь светового пучка сквозь призму изображен на рис. 394. Пучок сначала удалится от перпендикуляра OP, а затем приблизится к перпендикуляру $O'P'$. Так как обе стороны призмы не параллельны, то пучок, вышедший из призмы, не будет больше параллелен падающему пучку. Если взять призму из того же самого материала, но имеющую больший угол A, то свет испытает большее отклонение от своего первоначального направления. Так же, как и в случае пластинки, пучок как при входе в призму, так и при выходе из нее разобьется на две части: одну отраженную и другую, которая пройдет сквозь призму.

Подобные опыты, произведенные с самыми различными веществами, привели к установлению следующего общего закона: *всякий раз, когда свет из одной среды переходит под некоторым углом к границе раздела в другую среду, в которой скорость его меньше, он отклоняется от первоначального направления своего распространения, приближаясь к перпендикуляру, восставленному во второй среде к границе раздела; если же свет переходит в среду, в которой скорость его больше, то он отклоняется от первоначального направления своего распространения, удаляясь от того же самого перпендикуляра.*

433. Полное отражение; угол полного внутреннего отражения. Так как лучи, выходящие из такой среды, как например вода, и попадающие в среду меньшей плотности, как например воздух, всегда отклоняются, удаляясь от перпендикуляра, восставленного к границе раздела (см. IlA, ImB и т. д., рис. 395), то совершенно очевидно, что при увеличении угла, под которым лучи падают на поверхность раздела, выходя из воды наружу, будет достигнуто такое положение, когда преломленный луч будет *параллелен этой поверхности* (см. InC, рис. 395). Интересно знать, что произойдет с лучом Io, образующим с поверхностью угол падения IoP,' который еще больше. Вполне естественно предположить, что если луч nC скользил вдоль поверхности раздела, то луч Io совершенно не сможет выйти из воды. Действительно, следующий опыт полностью подтвердит наше предположение.

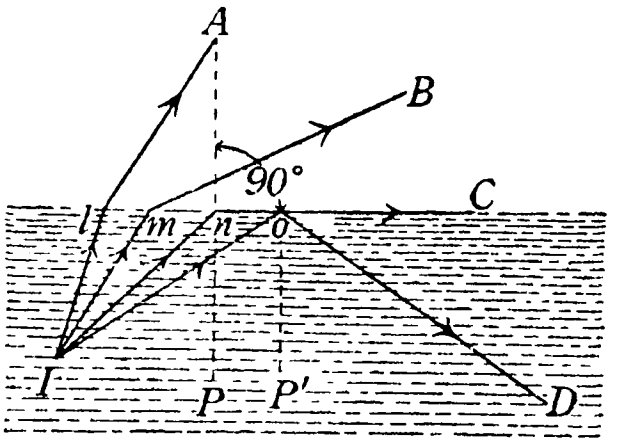


Рис. 395. Лучи от подводного источника I, падающие под разными углами на границу раздела между воздухом и водой.

Поставим призму, у которой средняя грань отшлифована, а задняя сделана матовой, на пути узкого пучка солнечного света, как показано на рис. 396. Если угол падения IOP невелик, то пучок разделится в точке O на части отраженную и прошедшую насквозь; первая пойдет по направлению OS', вторая — по направлению OS (вопрос о цвете оставим пока без внимания). Вращая медленно призму по направлению, указанному стрелкой, мы приведем ее в такое положение, когда пучок, прошедший насквозь,

совершенно исчезнет, в то время как световое пятно S' станет значительно ярче. Так как пучок, прошедший насквозь, исчезает полностью, то, очевидно, весь свет, падающий в точку O, должен быть теперь сосредоточен в отраженном пучке. Угол падения IOP, при котором это явление происходит, носит название предельного угла или угла полного внутреннего отражения. Для кронгласса угол этот равен 42,5°, для воды — 48,5°, для алмаза 23,7°. Критическим углом, или углом полного внутреннего отражения для любого вещества, называется такой угол падения из воздуха на поверхность из данного вещества, для которого угол преломления равен 90°.

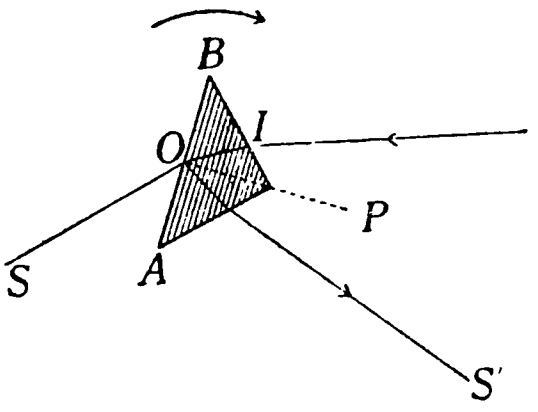


Рис. 396. Распространение и отражение света от поверхности AB прямоугольной призмы.

Отсюда мы заключаем, что когда луч света, распространяющийся в какой-либо среде, встречает другую среду, в которой скорость его больше, то он полностью отразится в том случае, если угол падения больше некоторого определенного угла, называемого предельным, или углом полного внутреннего отражения.

434. Объяснение явления преломления с точки зрения волновой теории. Заглянем внутрь высокой стеклянной банки, наполненной доверху водой, и отметим сбоку на стенке то место, где, как нам кажется при разглядывании сквозь воду, помещается дно (рис. 397). При этом во всех случаях наша отметка окажется ниже уровня воды приблизительно на три четверти всей глубины.

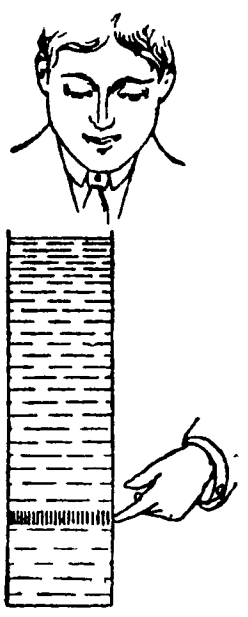


Рис. 397. Кажущаяся глубина водяного столба.

Согласно волновой теории это явление вызвано тем, что скорость света в воде меньше, чем в воздухе. Действительно, рассмотрим волну, выходящую из какой-либо точки P (рис. 398) под водой и идущую из этой точки с одинаковой скоростью по всем направлениям. В тот момент, когда фронт волны коснется в точке o поверхности, волна, конечно, будет иметь вид сферы, центр которой помещается в точке P. Пусть aob представляет собой сечение этой сферы. Если бы скорость света при переходе в воздух не изменилась, то в следующий момент волна попрежнему имела своим центром точку P и была бы ограничена пунктирной линией cod, которая проведена таким образом, что отрезки ac, oo и bd равны между собой. Однако, если скорость в воздухе больше, чем в воде, то в рассматриваемый момент возмущение достигнет вместо точки o_1, некоторой точки o_2, вследствие чего вышедшая волна на самом деле будет иметь форму, указанную сплошной

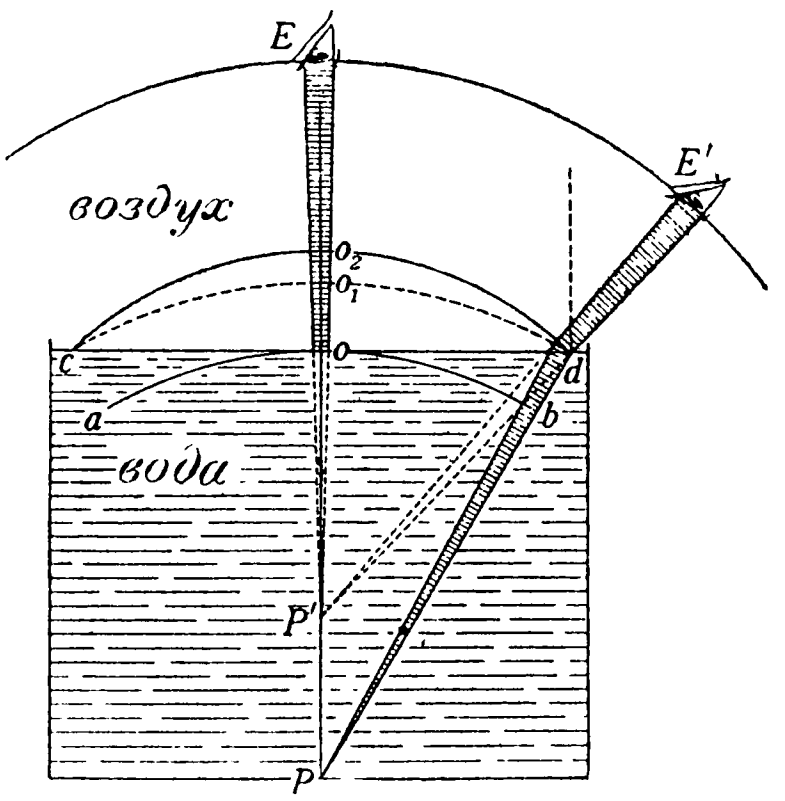
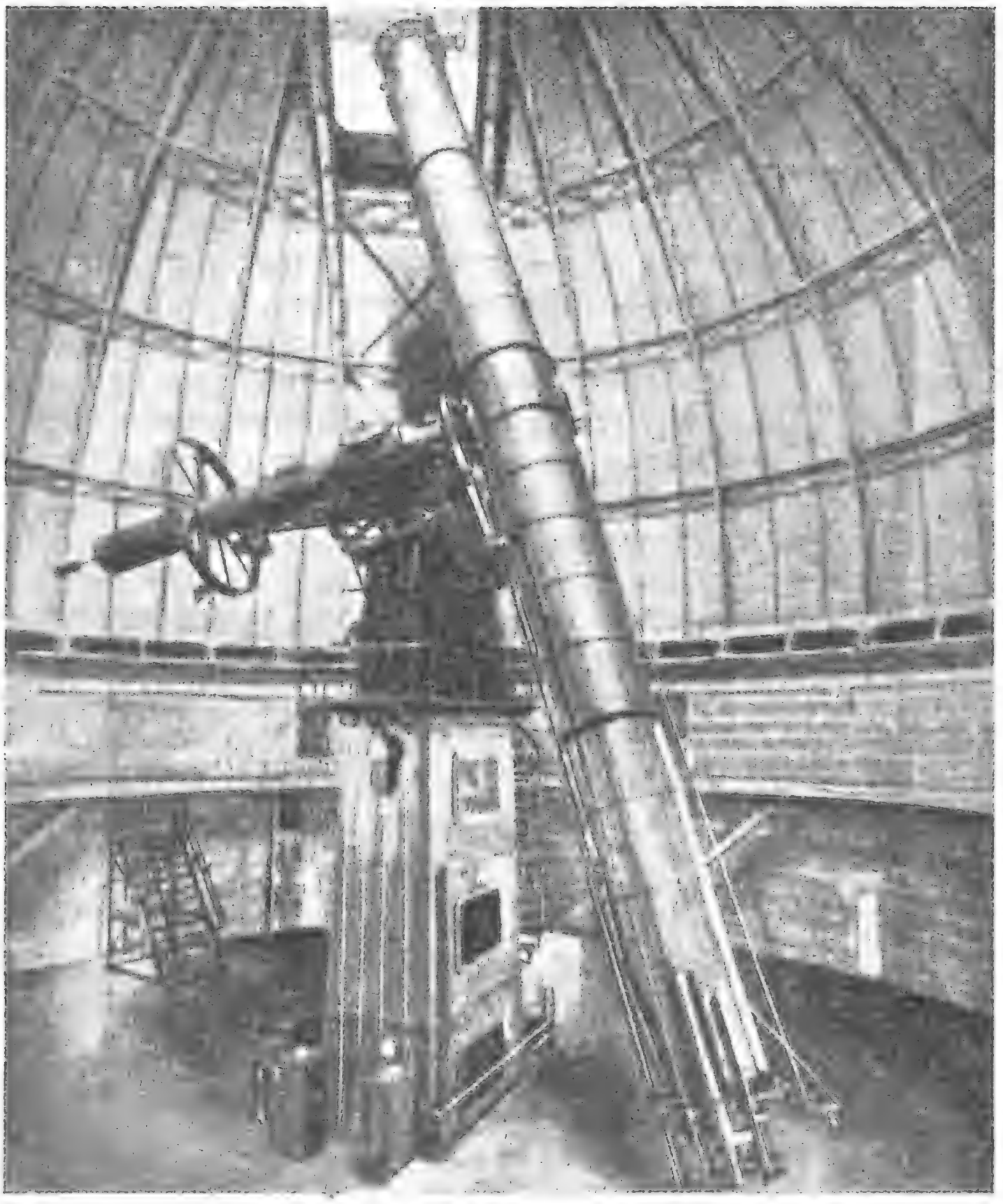


Рис. 398. Изображение волны, выходящей из воды в воздух.

линией co_2d, а не пунктирной линией co_1d. Но волна co_2d обладает большей кривизной, чем прежняя волна aob, и поэтому ее центр лежит в какой-нибудь точке P' выше точки P. Другими словами, при



БОЛЬШОЙ ТЕЛЕСКОП ИЕРКСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
(ЧИКАГСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Это самый большой р е ф р а к т о р в мире. Объектив его — ахроматическая линза (см. § 472), 100 *см* в диаметре, вделанная в трубу, длина которой 21 *м*. Чтобы следовать за кажущимся движением небесных тел, происходящим вследствие вращения земли, вся труба и подставка ее, весящие 21 тонну, связаны с гигантским часовым механизмом. Ход часов контролируется регулятором, в принципе аналогичным изображенному на рис. 179. С помощью электрических моторов можно направить телескоп в любое место. Затем телескоп соединяют с часовым механизмом, и тогда он остается направленным в ту же точку неба сколь угодно долго. Для удобства наблюдателя весь пол можно поднимать и опускать.

переходе из воды в воздух волна как бы выгибается вверх. Поэтому, когда участок этой волны попадает в глаз E, то наблюдателю кажется, что волна вышла не из P, а из P', потому что действительно

центр ее находится в P', а не в P. Таким образом мы приходим к заключению, что в том случае, если свет распространяется в воде медленнее, чем в воздухе, то все предметы, находящиеся в воде, кажутся наблюдателю ближе, чем они находятся на самом деле. Опыт с банкой, наполненной водой (стр. 321), полностью подтверждает приведенное здесь рассуждение.

Далее, когда глаз находится не в E, а в каком-нибудь другом положении, например, в E', то свет попадает в него по ломаному пути PE'; при этом световые лучи, попадающие под некоторым углом в среду, в которой скорость света больше, всегда преломляются, удаляясь от перпендикуляра к поверхности раздела. Если бы световые лучи переходили в среду, в которой скорость света меньше, то точка P казалась бы лежащей ниже ее действительного положения, потому что волна, входя в эту среду, вместо того чтобы выгибаться, сплющивалась бы, и поэтому центр ее кривизны лежал бы ниже P; поэтому нам казалось бы, что наклонно падающие лучи при преломлении приближаются к перпендикуляру к поверхности раздела, как это действительно было нами установлено в § 432.

435. Отношение скоростей света в воздухе и в воде. Описанный в § 434 опыт с высокой банкой, наполненной водой, не только указывает на то, что скорость света в воздухе больше, чем в воде, но он дает также простое средство определить отношение обеих скоростей. Действительно, на рис. 398 отрезок oo_2 изображает расстояние, пройденное волной в воздухе за тот же промежуток времени, в течение которого она прошла в воде расстояние ac $(= oo_1)$. Поэтому дробь $\frac{oo_2}{oo_1}$ представляет собою отношение скоростей света в воздухе и в воде.

Далее, кривизна дуг co_2d и co_1d измеряется обратными величинами соответствующих радиусов,[1] т. е.

$$\frac{\text{кривизна } co_2d}{\text{кривизна } co_1d} = \frac{\left(\frac{1}{(dP')}\right)}{\left(\frac{1}{dP}\right)} = \frac{dP}{dP'} \quad \ldots\ldots\ldots (1)$$

Однако, если соответствующие дуги малы, а это условие в действительности имеет место из-за малости зрачка (см. E и E' на рис. 398), то их кривизна практически пропорциональна высоте средней точки дуги над прямой co, [2] т. е.

$$\frac{\text{кривизна } co_2d}{\text{кривизна } co_1d} - \frac{oo_2}{oo_1} = \frac{\text{скорость в воздухе}}{\text{скорость в воде}} \quad \ldots\ldots (2)$$

[1] Учащемуся легко убедиться в том, что кривизна дуги обратно пропорциональна радиусу, из рассмотрения небольшого прямого кусочка стальной часовой пружины ab (рис. 399), которую можно изгибать, сообщая ей различную степень кривизны. Так, например, при сгибании пружины последовательно на 15°, 30° и 60° радиусы кривизны уменьшаются от $4r$ до $2r$ и r. Вообще кривизна дуги измеряется обратной величиною ее радиуса. Точно так же мы говорим, что «давление атмосферы измеряется высотой ртутного столба в барометре», потому что одна величина пропорциональна другой.

[2] Учащийся сможет без труда убедиться в справедливости этого утверждения, обратившись к рассмотрению рис. 400, где небольшие отрезки дуг различ-

Из сравнения формул (1) и (2) получается

$$\frac{\text{скорость в воздухе}}{\text{скорость в воде}} = \frac{dP'}{dP^1} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (3)$$

Когда мы смотрим прямо вниз, как в опыте с банкой, наполненной водой, отношение $\frac{dP}{dP'}$ переходит в $\frac{oP}{oP'}$, откуда

$$\frac{\text{скорость в воздухе}}{\text{скорость в воде}} = \frac{oP}{oP'} = \frac{\text{действительная глубина}}{\text{кажущаяся глубина}} \quad \ldots \quad (4)$$

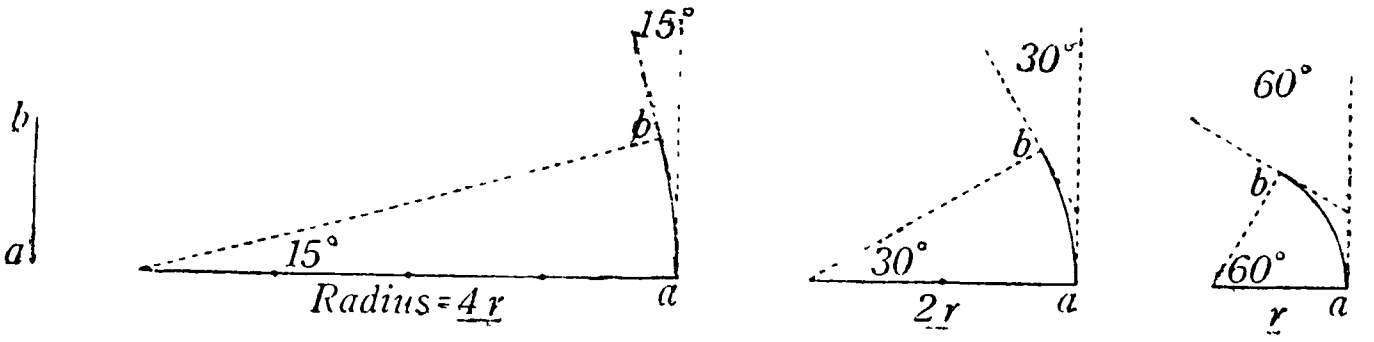


Рис. 399.

Однако в нашем опыте мы нашли, что отношение действительной глубины к кажущейся равно $\frac{4}{3}$, т.е. $\frac{oP}{oP^1} = \frac{4}{3}$. Отсюда мы заключаем, что в воде скорость света составляет три четверти скорости света в воздухе.

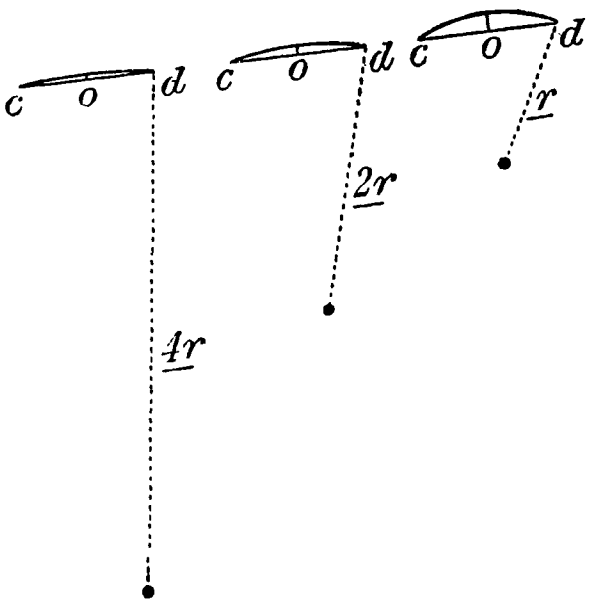


Рис. 400.

Одним из самых значительных успехов волновой теории является то обстоятельство, что величина этого отношения, определенная косвенным путем, совпадает со значением, найденным Фуко и Майкельсоном непосредственным измерением.

436. Показатель преломления. Показателем преломления какой-либо среды называется отношение скорости света в воздухе к скорости света в этой среде. Совершенно очевидно, что метод, использованный в последнем параграфе для определения показателя преломления воды, легко может быть применен к любой прозрачной — все равно жидкой или твердой — среде. [1]

ной кривизны стягиваются хордами одинаковой длины. Кривизна их относится, как 1 к 2 и к 4 (в зависимости от радиусов); длины перпендикуляров, опущенных из середин дуг на стягивающие их хорды, с приближением, достаточным для всех практических целей, находятся в отношении 1 к 2 и к 4.

[1] Для того чтобы продемонстрировать чрезвычайную простоту и точность этого метода определения показателя преломления, поступим следующим образом.

Прежде всего нам потребуется для нашей работы очень тонко отточенный карандаш. Нанесем на лист бумаги точку P, затем положим на лист стеклянную пластинку (рис. 401, 1) таким образом, чтобы край полоски, наклеенной у края пластинки, совпадал с точкой (в том случае, когда взята призма, ее вер-

Показатели преломления наиболее употребительных веществ приведены в следующей таблице:

Вода	1,33	Кронгласс	1,53
Спирт	1,36	Флинтгласс	1,67
Скипидар	1,47	Алмаз	2,47

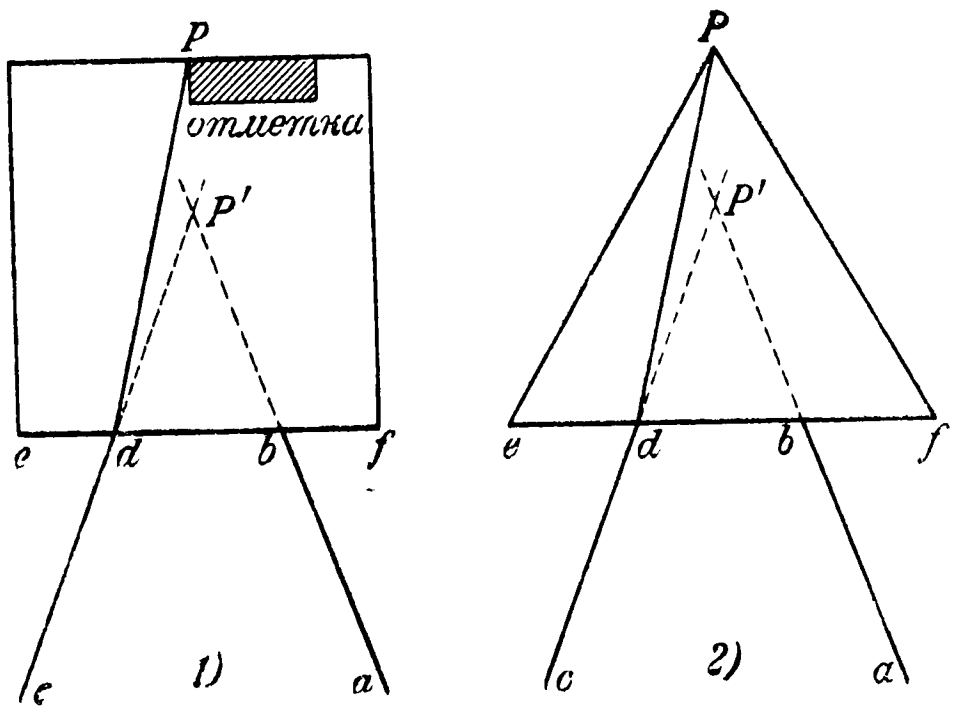


Рис. 401. Показатель преломления.

Резюме. **При переходе в оптически более плотную среду свет преломляется, отклоняясь в сторону перпендикуляра, восставленного в новой среде к поверхности раздела, а при переходе в оптически менее плотную среду свет преломляется, удаляясь от этого перпендикуляра.**

Полное отражение происходит в том случае, когда свет стремится попасть из более плотной среды в менее плотную под углом, который больше критического угла или угла полного внутреннего отражения.

Показатель преломления какого-либо вещества представляет собою отношение скорости света в воздухе к его скорости в данном веществе.

Вопросы и задачи. [1]

1. Сделайте чертеж, на котором покажите, как преломляется пучок света, 1) проходя сквозь призму, 2) проходя под углом сквозь оконное стекло.

2. Объясните, каким образом призматическое стекло автомобильной фары (рис. 402) отбрасывает сноп света на дорогу.

3. Рис. 403 изображает разрез пластинки из призматического стекла. Объясните, почему такие стекла значительно выгоднее обыкновенных оконных стекол для освещения закоулков и тесных подвалов в узких улицах.

4. Если положить монету на дно сосуда таким образом, чтобы она была скрыта от наблюдателя стенкой сосуда (рис. 404), то, налив в сосуд воду, ее сразу можно будет увидеть. Объясните, почему?

5. Палка, опущенная в воду, кажется сломанной, как показано на рис. 405. Объясните явление.

6. Стеклянная призма, помещенная, как показано на рис. 406, является самым лучшим средством для отражения света. Чем она лучше обыкновенного зеркала?

шина P должна совпасть с точкой). Обведем края пластинки карандашом по бумаге, строго следя за тем, чтобы пластинка при этом, также и во все время опыта, не сдвинулась с места. Далее положим на бумагу линейку в наклонном положении cd и, прищурив один глаз, будем визировать край линейки на то положение P, каким оно представляется при рассматривании сквозь стекло. Если мы уверены, что стекло не сдвинулось с места, то проведем острым карандашом прямую cd. Точно так же проведем другую прямую ab, симметричную с cd относительно центра пластинки. Уберем затем стекло и закончим чертеж, как показано на рисунке.

Точка P^1 представляет собой кажущееся положение точки P. Как мы видели только что в тексте, отношение скоростей света в воздухе и в стекле получится, если разделить dP на dP'. Измерим весьма тщательно эти расстояния с точностью до 0,1 *мм* и вычислим показатель преломления с точностью до второго десятичного знака. Полезно произвести опыт два или три раза и затем сравнить полученные результаты.

[1] Дополнительные вопросы и задачи к главе XVII помещены в приложении.

7. Для наблюдения высокостоящих светил в астрономических телескопах применяются особые окуляры, состоящие из прямоугольной призмы из кронгласса (рис. 407). Объясните их назначение.

8. Если свет распространяется в воздухе со скоростью 300 000 *км/сек*, то какова его скорость в воде, в кронглассе и в алмазе? (См. таблицу показателей преломления, стр. 324).

9. Камень, лежащий на дне ручья глубиною 60 *см*, кажется находящимся под поверхностью только на глубине 45,5 *см*. Объясните с помощью чертежа, почему водоемы

Рис. 402. Поперечное сечение автомобильной фары.

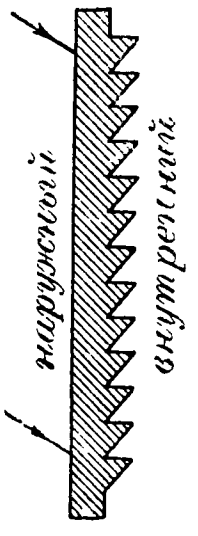


Рис. 403. Призматическое стекло.

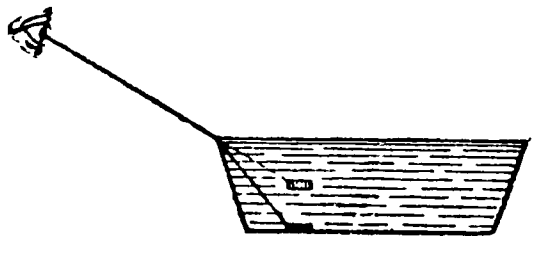


Рис. 404.

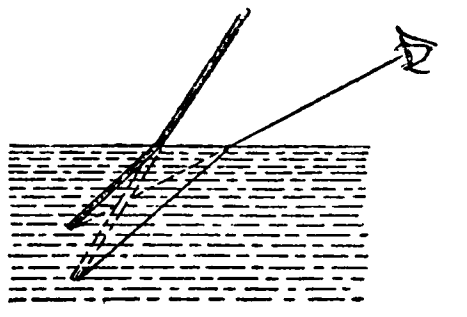


Рис. 405.

представляются всегда менее глубокими, чем они есть на самом деле.

10. Покажите на чертеже и объясните, что называется критическим углом, или углом полного внутреннего отражения.

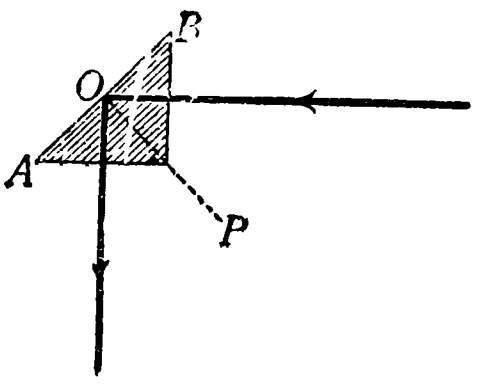


Рис. 406.

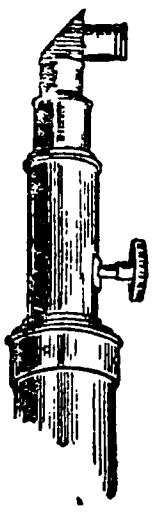


Рис. 407. Диагональный окуляр.

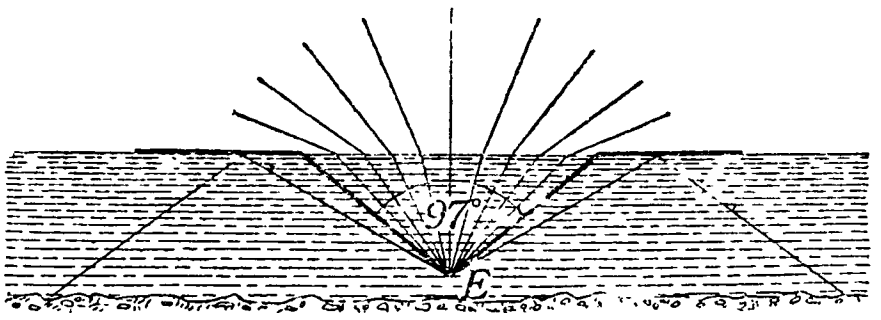


Рис. 408. Глазу, находящемуся под водой, кажется, что все внешние предметы лежат внутри конуса, у которого угол при вершине равен 97°.

11. При переходе пучка света из воды в флинтгласс удалится ли он от перпендикуляра, восставленного в стекле к поверхности раздела, или приблизится к нему?

12. Под каким углом к горизонту должна смотреть рыба, находящаяся под водой, для того чтобы увидеть заход солнца (см. рис. 408).

ГЛАВА XIX.

ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ.

ИЗОБРАЖЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ ЧЕЧЕВИЦ.

437. Фокусное расстояние вогнутой чечевицы. Поставим вогнутую чечевицу на пути узкого пучка солнечных лучей, входящего в затемненную комнату; для этого сделаем пучок видимым с помощью меловой пыли или табачного дыма. Мы увидим, что пучок соберется в фокусе F, как показано на рис. 410. Поместим в точке F экран. Полученное на экране ослепительно яркое пятно будет представлять собой очень маленькое изображение солнца. Не забудем измерить расстояние от чечевицы до этого изображения.

Объяснить это явление можно следующим образом: световые волны, испускаемые солнцем или каким другим отдаленным пред-

метом, не обладают заметной кривизной, когда они попадают в чечевицу, т. е. они являются так называемыми плоскими волнами (см. рис. 410). Так как скорость света в стекле меньше, чем в воздухе, центральные участки этих волн, проходя сквозь чечевицу, запаздывают больше, чем боковые. Поэтому по выходе из чечевицы волны являются уже не плоскими, а вогнутыми и сходятся в одном центре, или фокусе, в точке F.

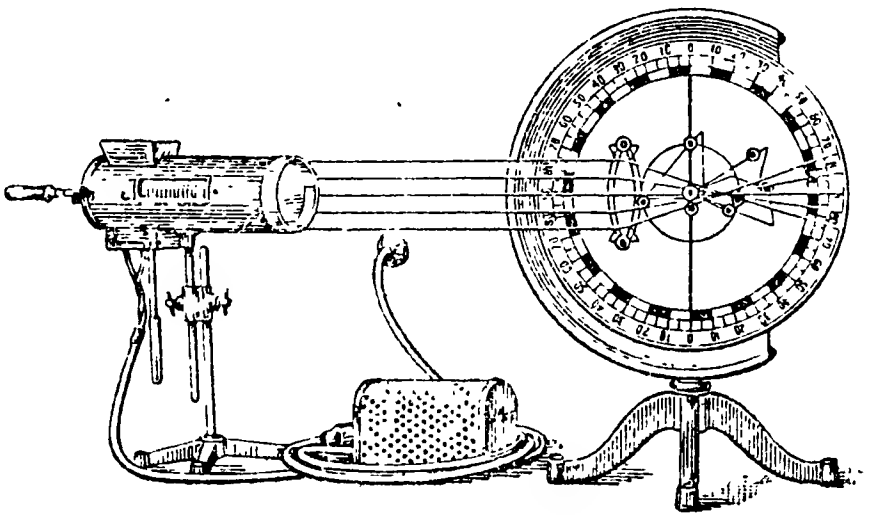


Рис. 409. Оптический диск.

Можно взглянуть на это же явление с несколько иной точки зрения, представив себе, что «лучи», попадающие в чечевицу, отклоняются ею по законам, изложенным в § 432, и проходят через точку F.

Главной оптической осью чечевицы называется прямая, проведенная перпендикулярно к ее поверхности через точку C (оптический центр). Точка F, в которой собираются все лучи, параллельные главной оптической оси (падающие плоские волны), называется главным фокусом.

Расстояние CF от центра чечевицы до главного фокуса называется главным фокусным расстоянием (f) чечевицы.

Повернем теперь чечевицу так, чтобы она была обращена к какому-нибудь отдаленному зданию, и поместим в главном фокусе F (см. рис. 411) кусок картона или, лучше, натянутый на раму холст для живописи. На экране получится резкое изображение отдаленного здания. Если встать теперь за экраном так, чтобы глаз находился от него на расстоянии приблизительно 30 *см*, то, убрав экран, можно будет увидеть изображение как раз в том месте, где помещался экран. Изображение, которое может быть получено на экране, называется действительным.

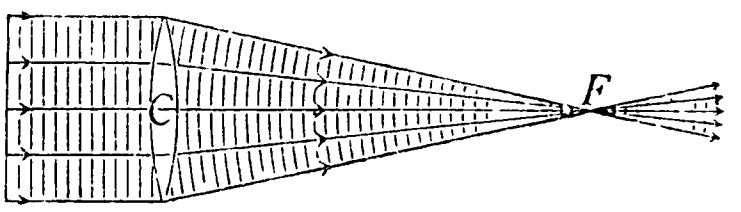


Рис. 410. Главный фокус F и фокусная длина CF выпуклой чечевицы.

Плоскость $F'FF''$ (рис. 411), в точках $F'F''$ и т. д. которой собираются плоские волны (параллельные лучи), приходящие в чечевицу по различным направлениям, как, например, лучи, идущие от фундамента и от крыши отдаленного здания, называется фокальной плоскостью чечевицы. В фокальной плоскости фотографического объектива должна, например, находиться фотографическая пленка при фотографировании отдаленных предметов.

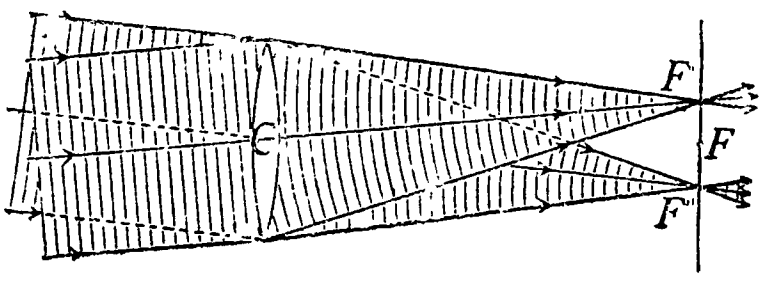


Рис. 411. Фокальная плоскость выпуклой чечевицы.

Так как за меру кривизны какой-либо дуги принимается обратная величина ее радиуса (см. примечание на стр. 322), то, следовательно, кривизна, сообщаемая чечевицей падающей

на нее плоской волне, равняется $\frac{1}{f}$. Мало того, какова бы ни была кривизна падающей волны, чечевица изменит ее кривизну всегда на одну и ту же самую величину $\frac{1}{f}$.

438. Сопряженные фокусы. Если поместить в фокусе F (рис. 410) точечный источник света, то, очевидно, свет, проходящий сквозь чечевицу, пойдет по тому же самому пути, который проходили параллельные лучи, собиравшиеся чечевицей в фокусе, т. е. чечевица сделает волны, испускаемые этим источником, плоскими, и выходящие из него световые лучи — параллельными главной оптической оси. Однако, если точечный источник P находится на расстоянии D_0, большем f (рис. 412), то волны, испускаемые P, пройдя сквозь чечевицу, будут обладать кривизной $\frac{1}{D_0}$, которая меньше их прежней кривизны $\frac{1}{f}$. Так как чечевица совершенно уничтожила кривизну волн, вышедших из F, и сделала их плоскими, то, уничтожив кривизну волн, испускаемых точкой P и обладающих меньшей кривизной (рис. 412),

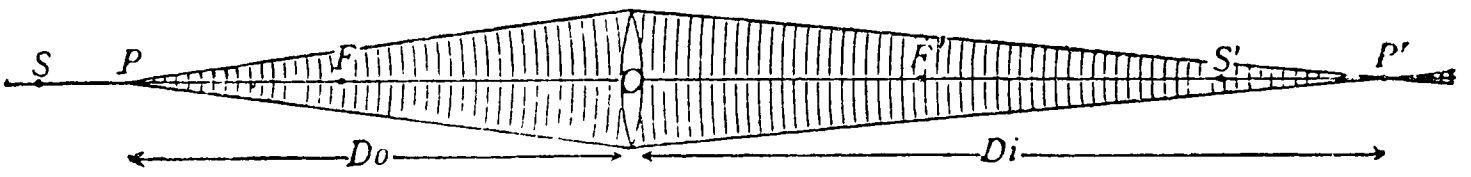


Рис. 412. Сопряженные фокусы.

чечевица сделает последние вогнутыми, т. е. лучи, пройдя сквозь чечевицу, образуют сходящийся пучок и пересекутся в точке P'. Если бы источник света был помещен в точке P', то лучи, очевидно, пересекались бы в точке P. Точки P и P', связанные таким образом, что одна из них является изображением другой, носят название сопряженных фокусов.

439. Формула для сопряженных фокусов; побочные фокусы. Так как на рис. 412 кривизна волны в тот момент, когда она выходит из чечевицы, противоположна по направлению кривизне волны при падении ее на чечевицу, сумма этих двух кривизн $\frac{1}{D_0} + \frac{1}{D_i}$ представляет собой величину полного изменения, производимого чечевицей в кривизне падающей волны. Но мы видели в § 437, что эта величина равняется $\frac{1}{f}$. Следовательно,

$$\frac{1}{D_0} + \frac{1}{D_i} = \frac{1}{f}, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

т. е. сумма обратных расстояний сопряженных фокусов от чечевицы равняется обратной величине главного фокусного расстояния. Если $D_0 = D_i$, то, как показывает уравнение, обе величины D_o и D_i равны $2f$.

Другими словами, если поместить точечный источник света в точке S на двойном фокусном расстоянии от чечевицы (рис. 412),

то свет от источника S, пройдя сквозь чечевицу, соберется как в фокусе в точке S', также лежащей от чечевицы на двойном фокусном расстоянии.

Два сопряженных фокуса S и S', лежащих на одинаковых расстояниях от чечевицы, называются побочными фокусами.

440. Изображения предметов. Расположим свечу или электрическую лампочку в плоскости PQ между главным фокусом F и побочным фокусом S (рис. 413) и затем в плоскости $P'Q'$ поместим белый экран. Мы увидим на экране увеличенное обратное изображение свечи или лампочки.

Изображение получается следующим образом: все световые лучи, выходящие из точки P и падающие на чечевицу, собираются

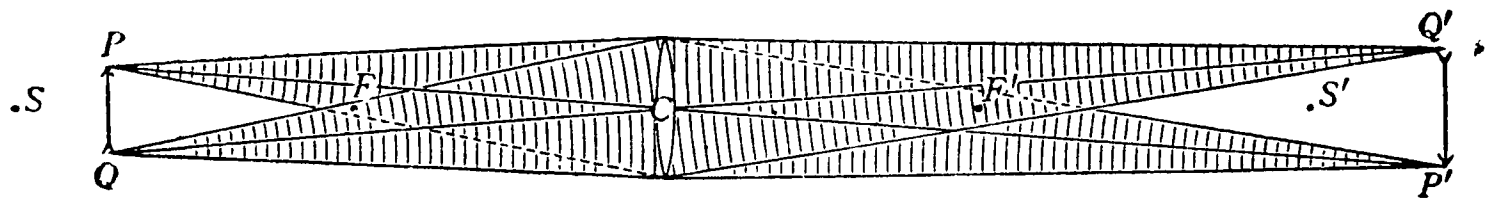


Рис. 413. Получение действительного изображения с помощью чечевицы.

в точке P'. Изображение P' должно лежать на прямой, проведенной из P через C; действительно, всякий луч, прошедший через C, должен остаться параллельным своему первоначальному направлению, потому что те участки чечевицы, куда он падает и откуда выходит, можно считать небольшими параллельными плоскостями (см. § 432). Таким образом, изображение $P'Q_2'$ всегда заключено между прямыми, проведенными из P и Q через C.

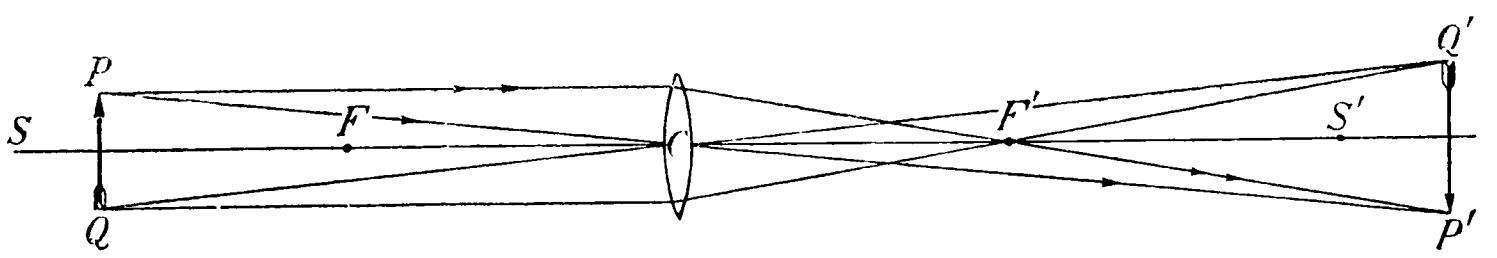


Рис. 414. Геометрический способ построения изображения.

Если известны фокусное расстояние f и расстояние D_0, на котором находится предмет, то расстояние до изображения D_i легко может быть получено из формулы (1).

Положение изображения можно также найти графически следующим образом: среди всех лучей, вышедших из P и коническим пучком проходящих сквозь чечевицу, через главный фокус F пройдет тот луч, который параллелен главной оптической оси (см. § 437). Пересечение этого луча после выхода из чечевицы с прямой, проведенной через C, даст изображение P точки P' (см. рис. 414). Таким же образом находится изображение Q' точки Q.

441. Размеры изображения. Так как изображение и предмет

всегда заключены между пересечением прямых PP' и QQ', из подобия треугольников PCQ и $P'CQ'$ следует

$$\frac{PQ}{P'Q'} = \frac{D_0}{D_1}, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

т. е.

$$\frac{\text{размеры предмета}}{\text{размеры изображения}} = \frac{\text{расстояние предмета от чечевицы}}{\text{расстояние изображения от чечевицы}}.$$

1. Рис. 414 и формулы (1) и (2) показывают, что, когда предмет находится в S, а изображение в S', предмет и его изображение имеют одинаковые размеры.

2. При удалении предмета от S' на бóльшее расстояние, изображение его перемещается из S' в F', причем размеры его все время уменьшаются.

3. При перемещении предмета из S в F изображение его уходит на далекое расстояние вправо, все время увеличиваясь в размерах.

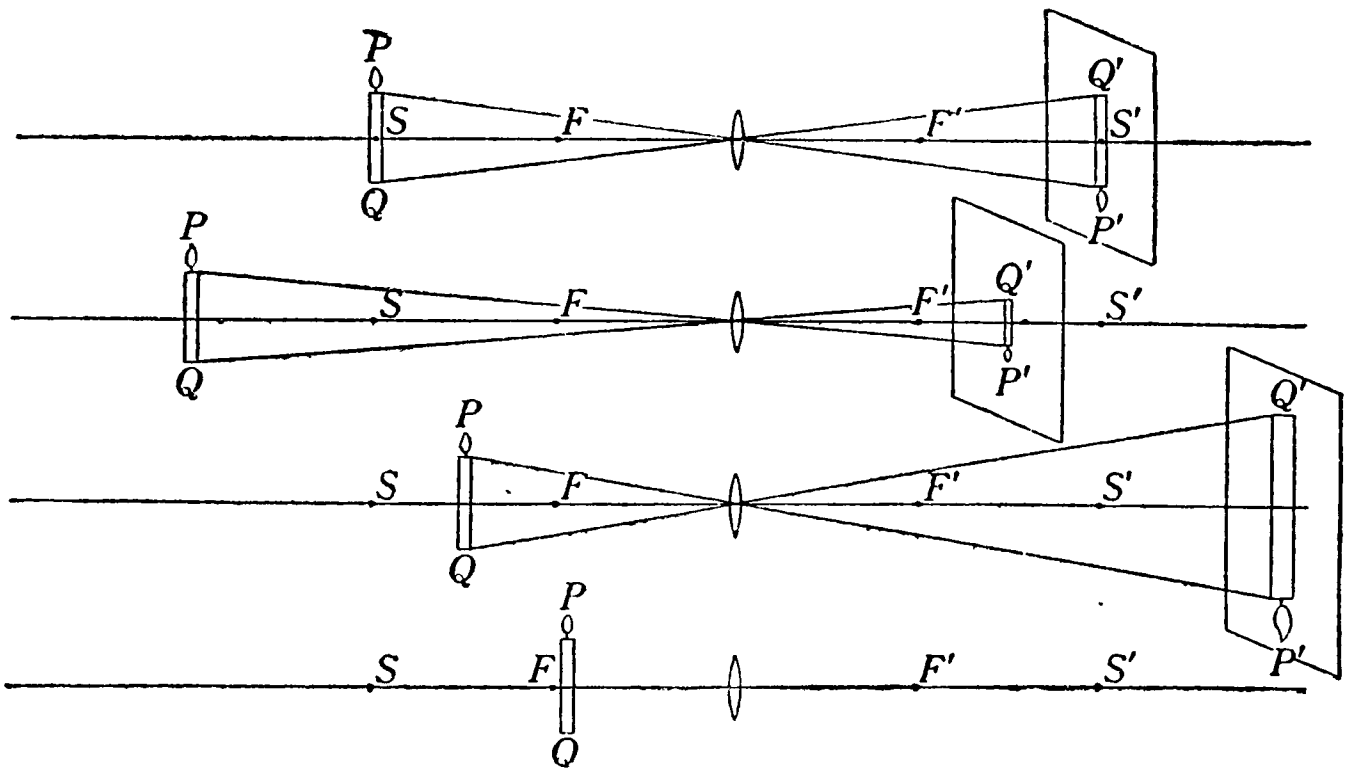


Рис. 415. Относительные размеры изображения и предмета.

4. Когда предмет находится в F, из чечевицы выходят плоские волны (параллельные лучи), вследствие чего не получается действительного изображения.

Эти четыре вывода представлены схематически на рис. 415. Проверьте их на опыте с помощью какого-нибудь предмета, чечевицы и экрана, как это было сделано в § 440.

442. Мнимое изображение. Мы видели, что, когда предмет находится в главном фокусе F, световые лучи, пройдя сквозь чечевицу, распространяются в виде плоских волн. Если же предмет находится между главным фокусом F и чечевицей, то выходящие волны, хотя кривизна их уменьшится, останутся вогнутыми, и поэтому глазу, находящемуся в E, будет казаться, что они вышли из точки P (рис. 416). Так как на самом деле световые лучи, выходящие из P, не попадают в P', такое изображение называется м н и м ы м и з о б р а ж е н и е м. Мнимое изображение нельзя получить на экране, и оно доступно только наблюдению глазом, или, как говорят, субъективному наблюдению.

Мнимое изображение можно построить графически тем же самым способом, которым мы воспользовались в случае действительного изображения (§ 440). Легко видеть, что в этом случае (рис. 416 и 417)

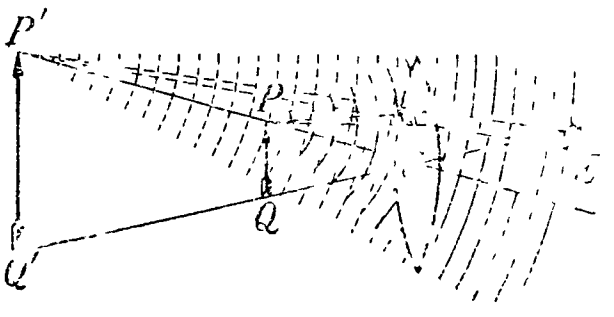


Рис. 416. Мнимое изображение, образованное выпуклой чечевицей.

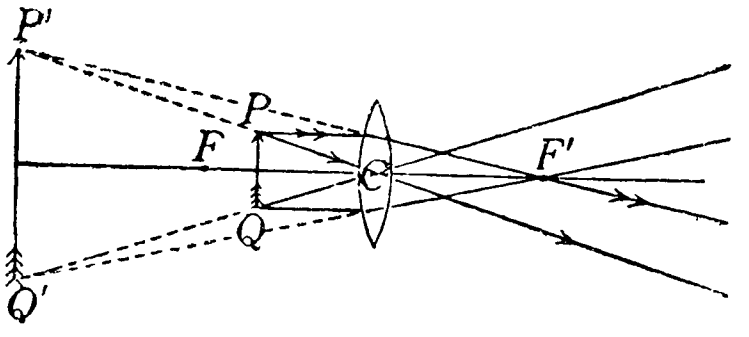


Рис. 417. Геометрический способ определения местоположения мнимого изображения в выпуклой чечевице.

изображение получается прямое и увеличенное.

443. Изображения, получаемые с помощью вогнутых чечевиц. Когда плоская волна падает на вогнутую чечевицу, она должна выйти в виде расходящейся волны, потому что средние участки волны замедляются меньше, чем края волны (рис. 418). Точка F, являющаяся кажущимся источником плоских волн после их прохождения сквозь такую чечевицу, называется главным фокусом чечевицы. Так же как и в случае выпуклой чечевицы центры волн, испускаемых точками P и Q (рис. 419), т. е. изображения P' и Q', должны лежать на прямых P и Q; благодаря тому, что кривизна чечевицей увеличивается, точки P' и Q' должны лежать ближе к чечевице, чем P и Q. Рис. 419 показывает, как с помощью такой чечевицы получается изображение. Изображение в этом случае всегда действительное, прямое и уменьшенное. Графический метод построения изображений представлен на рис. 420.

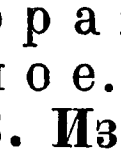


Рис. 418. Мнимый фокус вогнутой чечевицы.

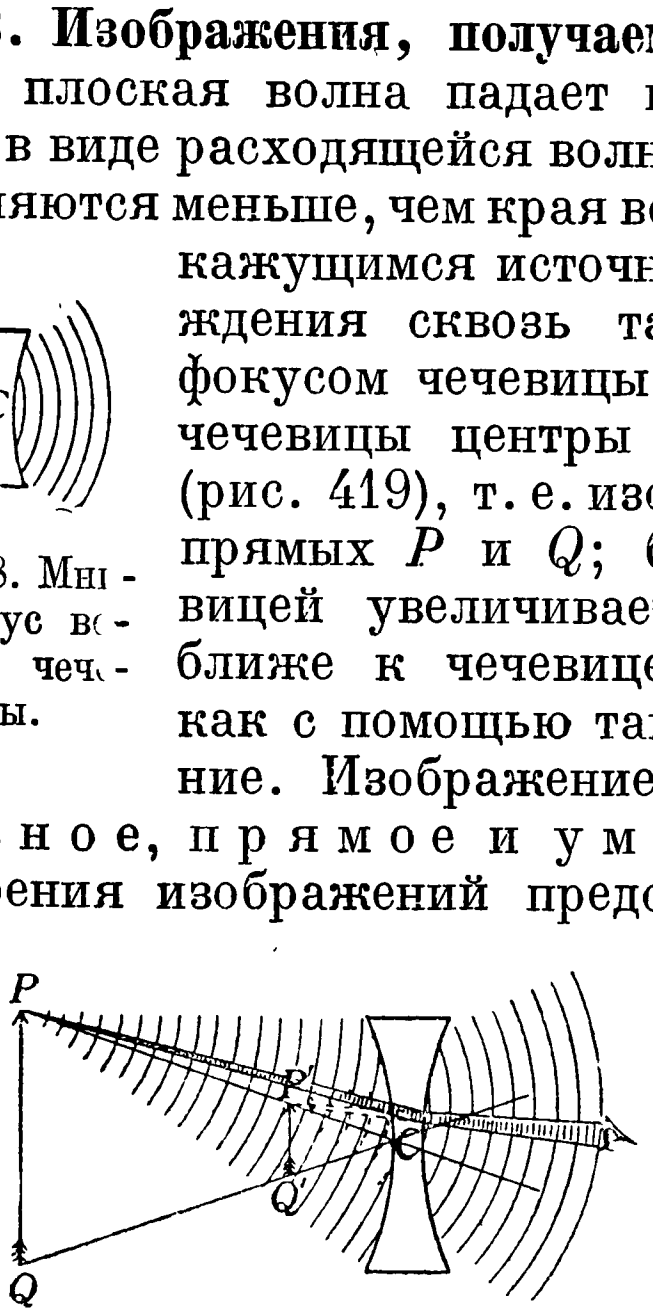


Рис. 419. Изображение в вогнутой чечевице.

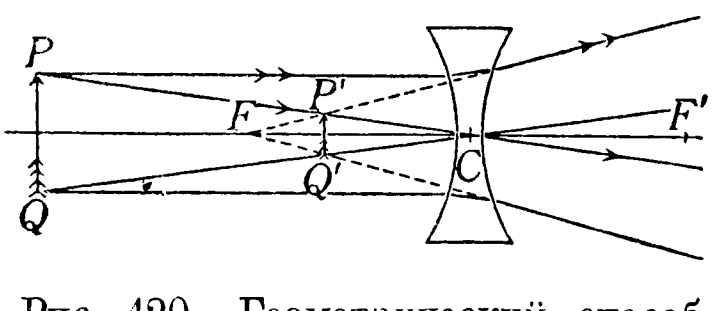


Рис. 420. Геометрический способ нахождения изображения в вогнутой чечевице.

Резюме. **1. Действительные изображения всегда являются обратными, мнимые изображения — прямыми. Размеры изображений определяются формулами:**

$$\frac{L^0}{L_i} = \frac{D_0}{D},$$

где D_0 и D_i обозначают соответственно размеры объекта и изображения, а D_0 и D_i — их расстояния от чечевицы или зеркала.

2. Выпуклые чечевицы всегда собирают световые лучи, уменьшая кривизну волн.

a. Если объект отстоит от чечевицы больше чем на фокусное расстояние, то изображение получается д е й с т в и т е л ь н о е и (1) у в е л и ч е н н о е в том случае, когда объект находится дальше главного фокуса, но ближе двойного фокусного расстояния; (2) изображение получается д е й с т в и т е л ь н о е и у м е н ь ш е н н о е, когда объект отстоит дальше, чем на двойное фокусное расстояние.

b. Если объект находится между чечевицей и главным фокусом, то изображение получается всегда д е й с т в и т е л ь н о е и у в е л и ч е н н о е.

3. Вогнутые чечевицы всегда рассеивают световые лучи, увеличивая кривизну волн. Изображение в с е г д а п о л у ч а е т с я д е й с т в и т е л ь н о е и у м е н ь ш е н н о е при любом положении объекта.

4. $$\frac{1}{D_0} + \frac{1}{D_i} = \frac{1}{f}. \qquad (\S\ 439).$$

Эта формула применима во всех случаях; при пользовании ею следует, однако, помнить, что:

a. D_0 всегда считается положительной величиной.

b. D_i считается положительной величиной для действительных изображений и отрицательной для мнимых изображений.

c. f считается положительной величиной для собирательных стекол (выпуклых чечевиц) и отрицательной для рассеивающих стекол (вогнутых чечевиц).

Вопросы и задачи.

1. Укажите разницу между действительным и мнимым изображением.

2. Покажите на чертеже, как должны быть расположены друг относительно друга предмет, изображение и чечевица, для того чтобы выпуклая чечевица давала действительное изображение.

3. В каких случаях выпуклая чечевица дает действительное и в каких — мнимое изображение? В каких случаях — увеличенное изображение и в каких — уменьшенное? В каких случаях — прямое изображение и в каких — обратное?

4. Какое изображение дает вогнутая чечевица? Почему оно не может быть больше предмета?

5. Лучи выходят из источника, расположенного на расстоянии 20 *см* перед собирательным стеклом с фокусным расстоянием, равным 4 *см*. Где лучи соберутся в одну точку?

6. Чему равняется фокусное расстояние чечевицы, если изображение предмета, удаленного на 30 *см*, получается на расстоянии 9 *см* от линзы?

7. Если высота предмета в задаче 6 составляет 1,5 *см*, то какой величины получится изображение?

8. На каком расстоянии от выпуклой чечевицы с фокусным расстоянием, равным 12 *см*, должен находиться предмет, для того чтобы его действительное изображение было в два раза больше самого предмета?

9. Где нужно поместить предмет, для того чтобы с помощью выпуклой чечевицы с фокусным расстоянием, равным 45 *см*, получить действительное изображение, размеры которого в три раза превышали бы размеры предмета?

10. Часовщик при работе держит отдельные части часового механизма на расстоянии 4,5 *см* от приставленной к глазу чечевицы с фокусным расстоянием, равным 5,5 *см*. На каком расстоянии от чечевицы получается мнимое изображение? Во сколько раз диаметр изображения часового колесика больше диаметра самого колесика?

ИЗОБРАЖЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ ЗЕРКАЛ.

444. Изображение точки в плоском или в кривом зеркале. Мы все привыкли к тому, что глазу, находящемуся в E и всматривающемуся в плоское зеркало mn, карандашное острие, помещенное в P, представляется находящимся в какой-то точке P' позади зеркала.

Мы можем, конечно, на опыте найти точное положение изображения P' по отношению к P и к зеркалу, но мы можем определить то же самое следующим чисто теоретическим путем. Рассмотрим световую волну, выходящую из точки P (рис. 421) и распространяющуюся по всем направлениям. Пусть aob представляет собой сечение волны в тот момент, когда она достигает отражающей поверхности mn. Если бы не было этой поверхности, то в следующий момент волна перешла бы в положение, обозначенное пунктирной линией co_1d. Однако, так как у поверхности mn произошло отражение и так как отраженная волна распространяется в обратном направлении с той же самой скоростью, как и падающая волна, то в рассматриваемый момент отраженная волна перейдет в положение, отмеченное линией co_2d и характеризуемое равенством отрезков oo_1 и oo_2. Но волна co_2d имеет своим центром точку P'; легко убедиться в том, что точка P' должна лежать на таком же расстоянии позади зеркала, на каком точка P находится перед зеркалом, потому что co_1d и co_2d являются дугами одинаковых окружностей и стягиваются одной и той же хордой cd. По той же самой причине точка P' должна лежать на перпендикуляре, опущенном на mn из точки P.

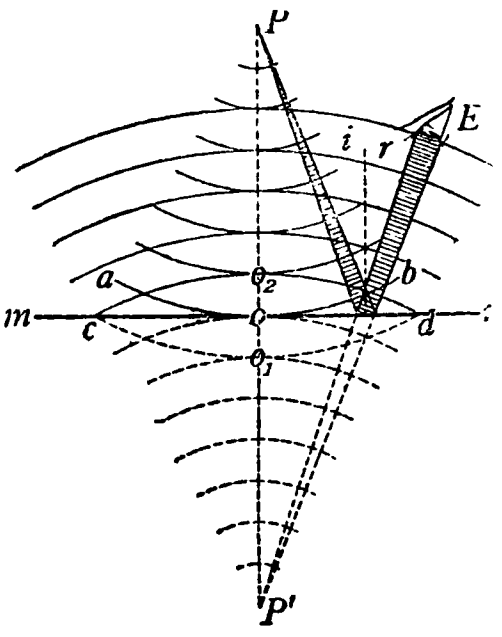


Рис. 421. Отражение волны от плоской поверхности.

Поэтому, когда участок отраженной волны co_2d попадает в глаз, расположенный в E, то последнему кажется, что волна вышла из P', а не из P, так как, действительно, центр этой волны находится не в P, а в P'. Следовательно, точка P' является изображением точки P. Таким образом, мы приходим к заключению, что изображение точки в плоском зеркале лежит на перпендикуляре, опущенном на зеркало из этой точки, и находится на таком же расстоянии за зеркалом, на котором точка лежит перед зеркалом.

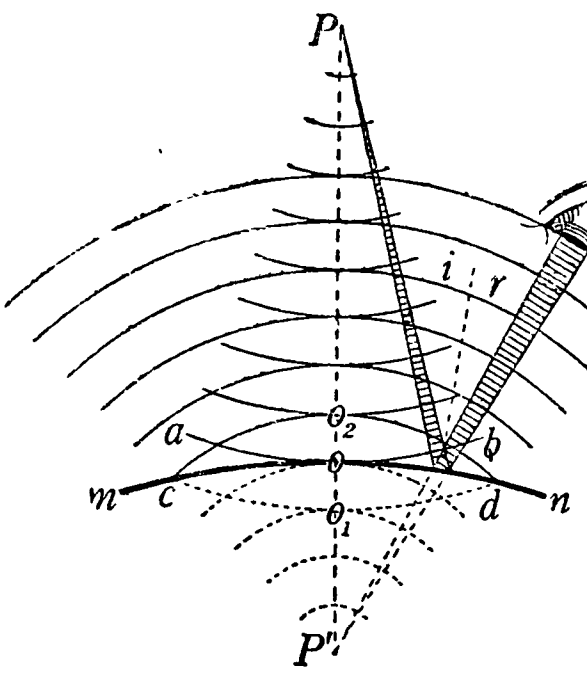


Рис. 422. Отражение волны от выпуклой поверхности.

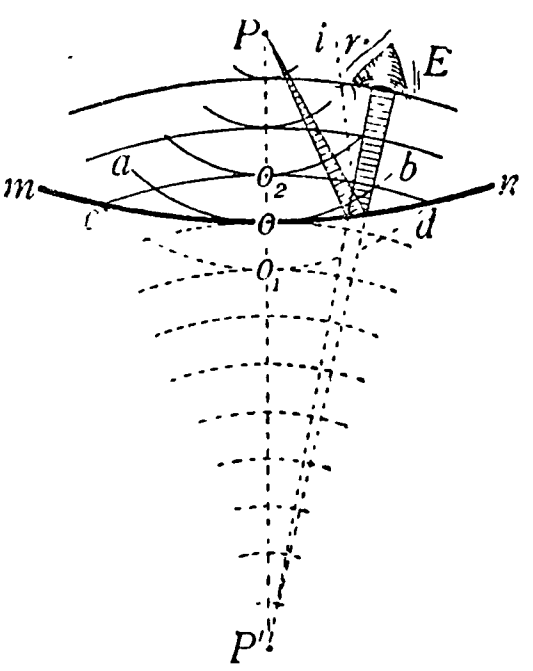


Рис. 423. Отражение волны от вогнутой поверхности.

В случае кривого зеркала точно такое же построение (рис. 422 и 423) сразу же показывает, что изображение точки должно лежать на перпендикуляре, опущенном из этой точки на зеркало; в случае выпуклого зеркала изображение точки ближе к зеркалу, чем сама точка; в случае же вогнутого зеркала изображение (если оно только не получается впереди зеркала, т. е. мнимым) находится от зеркала дальше, чем сама точка.

445. Построение изображения предмета в плоском зеркале. Изображение какого-либо предмета в плоском зеркале (рис. 424) легко найти, если к каждой точке предмета применить установленный выше закон, т. е. опустить из каждой точки перпендикуляры на отражающую поверхность и отложить на них по другую сторону зеркала отрезки, равные расстоянию точек до зеркала.

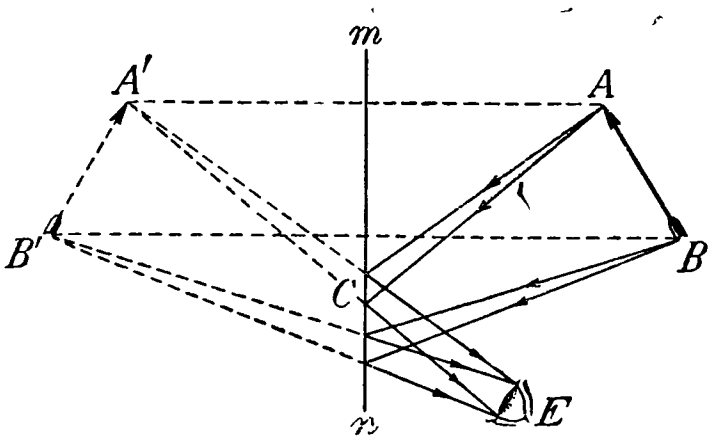


Рис. 424. Построение изображения предмета в плоском зеркале.

Для того чтобы установить путь, по которому идут к глазу E лучи от произвольной точки предмета, например, точки A, достаточно провести к глазу прямую через изображение A' и соединить с точкой A пересечение этой прямой с зеркалом. Ломаная прямая ACE представит собой искомый путь лучей.

По обе стороны куска оконного стекла поместим на равных расстояниях на одном перпендикуляре к поверхности стекла свечу (рис. 425) и бутылку, наполненную водой. При этом нам будет казаться, что свеча горит в воде. Этим объясняется большое число известных оптических обманов, как, например, «фигура, висящая в воздухе», «человек без нижней части туловища», «духи на сцене» и пр. В последнем случае иллюзия создается тем, что зрители видят артистов сбоку сквозь очень прозрачное стекло, края которого скрыты драпировками. Если поместить сильно освещенные фигуры перед стеклом, скрыв их от зрителей, то последним будет казаться, что фигуры эти находятся среди артистов.

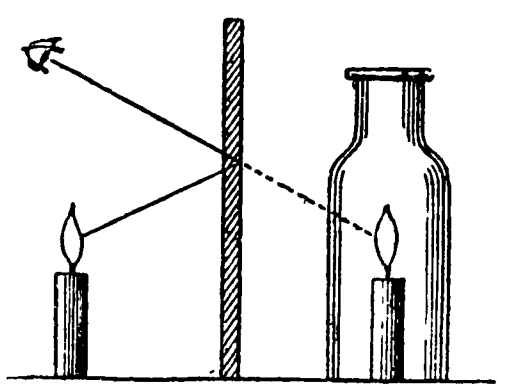
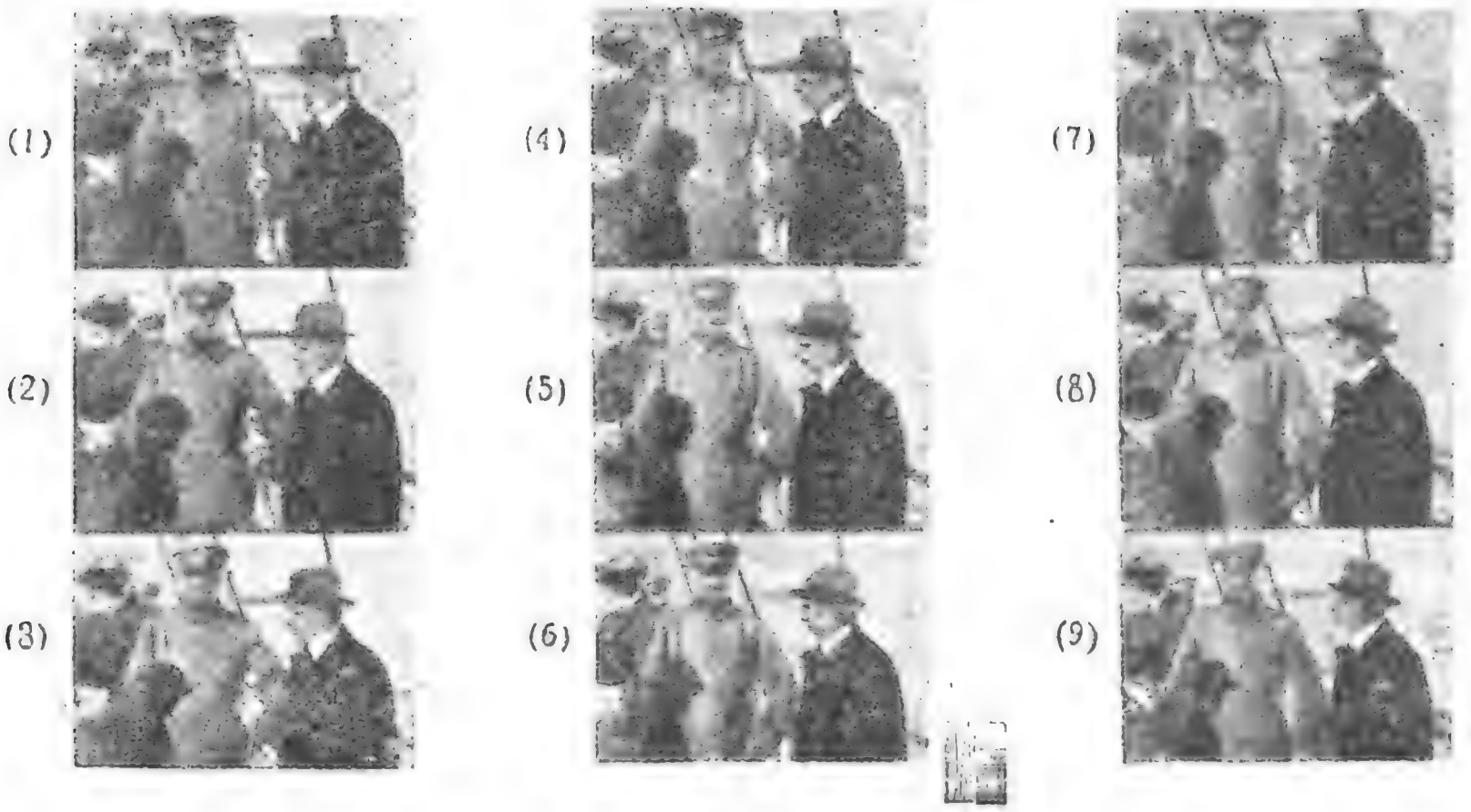


Рис. 425. Положение в плоском зеркале.

446. Фокусное расстояние кривого зеркала равняется половине радиуса его кривизны. На рис. 426 представлено действие, производимое выпуклым зеркалом на падающие на него плоские волны.

Волна, которая в некоторой определенный момент должна была занимать положение co_1d, на самом деле заняла положение co_2d, причем $oo_1 = oo_2$. Фокусом зеркала называется точка, из которой, как представляется глазу E, исходят волны.

Даже в том случае, если дуга cod невелика, то за меру ее кривизны можно принять — не делая при этом сколько-нибудь заметной ошибки — отрезок o_1o (см. примечание на стр. 322), т. е. возвышение средней части кривой cod над прямой co_1d. Так как o_1o было принято



ЧАСТЬ КИНО-ФИЛЬМА.

Кино-аппарат производит ряд моментальных снимков, обычно 16 в секунду. Пленка движется мимо объектива толчками: он покоится в момент съемки и движется, пока затвор закрыт. Величина снимков — 2 *см* в вышину, 2,5 *см* в ширину. Так как мимо объектива в секунду проходит 30 *см* пленки, то настоящий фильм, длиною в 300 *м* (обычная длина), содержит 16 000 снимков. С негативов печатаются позитивы, которые и употребляют в проекционном аппарате. Оптическая иллюзия, что картины движутся, вызвана одной особенностью глаза. Иллюстрируем ее так. Будем быстро вращать по кругу головню. Мы увидим светящуюся дугу. Это происходит потому, что мы продолжаем видеть предмет еще и после исчезновения его с нашей ретины в течение малой доли секунды. Эта доля секунды несколько различна у разных индивидуумов. Так называемые д в и ж у щ и е с я картины вовсе не движутся. На экране появляются одна за другой 16 вполне неподвижных картин в секунду. А в промежутках между ними — экран абсолютно темен. В эти моменты темноты фильм скачком продвигается вперед, пока перед объективом не окажется следующая картина. Глаз наш, однако, не различает периодов темноты, ибо продолжает видеть предыдущую картину не только в течение периода темноты, но даже еще смутно, в течение момента, когда на экране уже появилась следующая картина. Поэтому, следующие друг за другом неподвижные картины, очень мало отличающиеся одна от другой, плавно переходят одна в другую и создают впечатление движения.

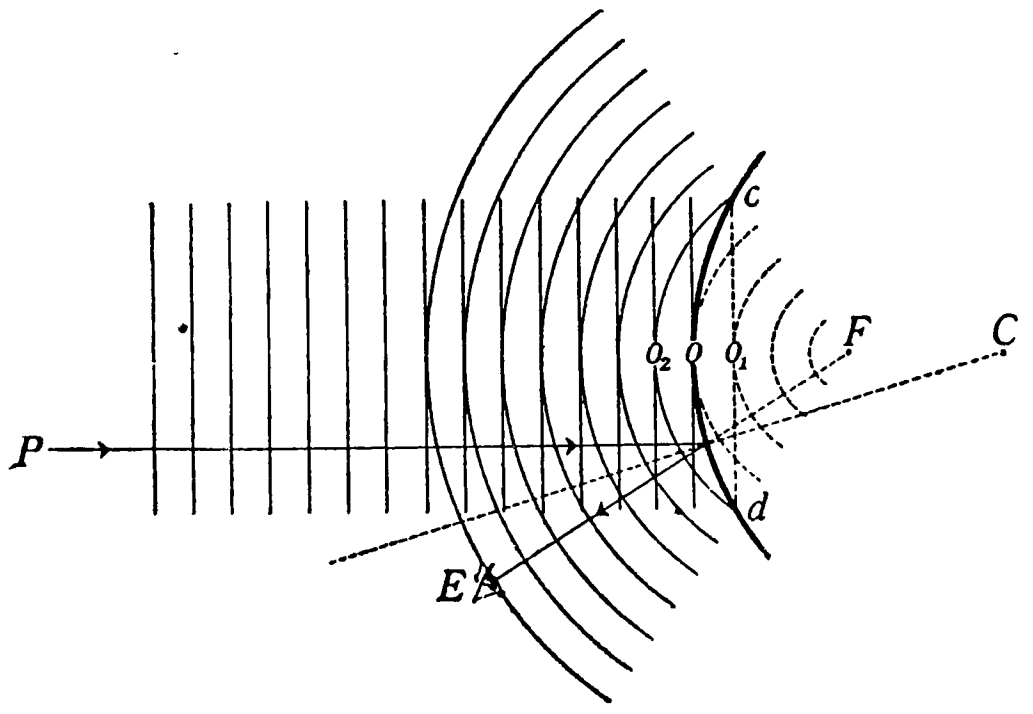
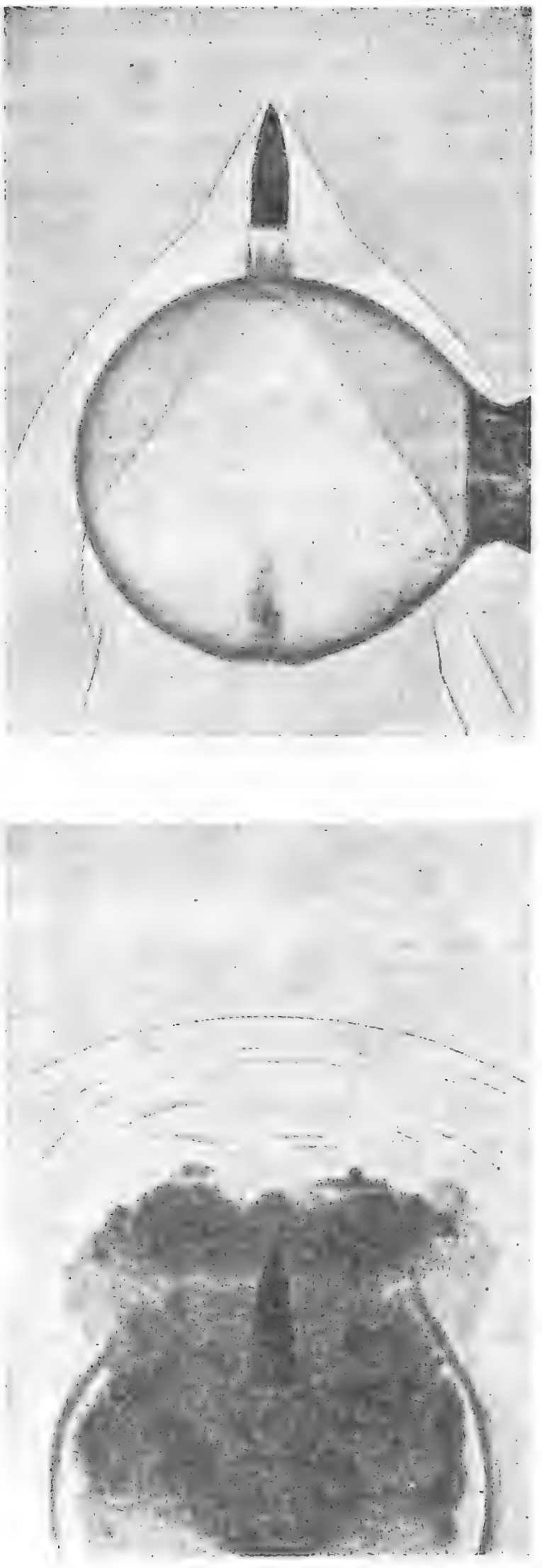


Рис. 426. Отражение плоской волны от выпуклого зеркала.

равным oo_2, мы получаем $o_1o_2 = 2o_1o$; т. е. кривизна $\frac{1}{f}$ отраженной волны равняется удвоенной кривизне зеркала, или $\frac{1}{f} = 2 \cdot \frac{1}{R}$, откуда $f = \frac{R}{2}$. Другими словами, фокусное расстояние зеркала равняется половине его радиуса.

447. Изображение предмета в выпуклом зеркале. Нам всем хорошо известно, что в выпуклом зеркале всегда получается за зеркалом мнимое, прямое и уменьшенное изображение. Причина этого явствует из рис. 427. Изображение точки P, так же как и в плоском зеркале



КОНТРАСТНЫЙ СНИМОК ПУЛИ ВО ВРЕМЯ ПОЛЕТА.

Здесь изображены тени, отброшенные на фотографическую пластинку пролетающей пулей, звуковой волной, неправильными вихрями, крупицами пороха и т. п. В момент прохождения пули перед фотографической пластинкой в абсолютно темной комнате была произведена блестящая электрическая искра, вызвавшая на момент тень. На фотографии изображены 0,30-калибровые пули, выпущенные из ружья системы Спрингфильд; продолжительность трической искры была $1/500/000$ секунды. Налево виден край дула ружья, а в центре чер-ного облака из частичек пороха слабо видна пуля, находящаяся на 3 *см* впереди дула и летящая со скоростью 900 *м* в сек. Слабая сферическая звуковая волна, видная впереди облака газа, является волной сжатия, вызванной в дуле движением пули, вырывающейся из патрона. Черное пространство перед пулей — это газы, опередившие пулю, а газы позади пули — движут ее. Меньшая, но более интенсивная звуковая волна является главной причиной отдачи ружья. На правом рисунке видна пуля, прошедшая сквозь мыльный пузырь, наполненный смесью воздуха с водородом, по которому звук распространяется со скоростью в 1066 *м* в сек., т. е. на 166 *м* в сек. скорее воздуха. На этом рисунке ясно видно, как обе волны пули изменили свой вид вследствие большой скорости звука в смеси воздуха с водородом.

(см. § 444), всегда лежит на перпендикуляре к зеркалу и притом на более близком расстоянии к зеркалу, чем фокус F, так как при удалении точки P из непосредственной близости к зеркалу, когда ее изображение лежит сейчас же за зеркалом, на бесконечность изображение точки P доходит только до фокальной плоскости, прове-

денной через F. Таким образом, изображение должно лежать где-нибудь между F и зеркалом. Изображение $P'Q'$ предмета PQ получается сильно уменьшенное, потому что оно заключено между сходящимися прямыми PC и QC. Построить это изображение можно, проведя систему падающих и преломленных лучей (рис. 427), как и в случае вогнутой чечевицы. Действительно, выпуклое зеркало и вогнутая чечевица обладают совершенно одинаковыми оптическими свойствами, так как в обоих случаях происходит одинаковое увеличение кривизны падающих волн в отношении $\frac{1}{f}$.

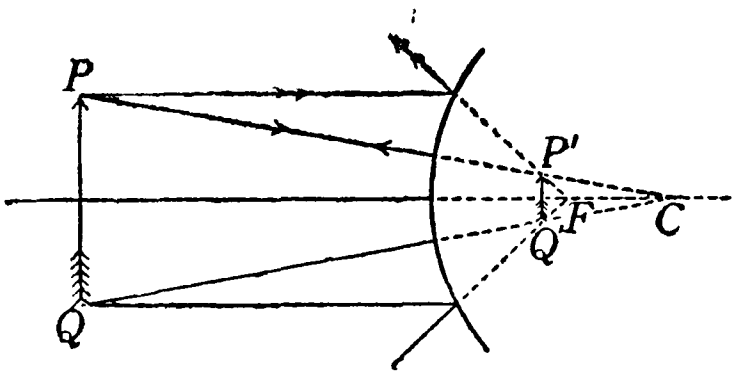


Рис. 427.

448. Изображения в вогнутых зеркалах. Изображения, получаемые в вогнутом зеркале, подвергнем такому же изучению, как изображения, получаемые с помощью выпуклых чечевиц. При этом окажется, что получается совершенно одинаковая зависимость характера изображения от относительного положения предмета и зеркала или чечевицы: если предмет находится между зеркалом и его главным фокусом, то изображение получается мнимое, увеличенное и прямое; если же предмет помещается в фокусе, то отраженные волны — плоские, т. е. лучи от всех точек предмета идут параллельным пучком; наконец, если предмет находится между главным фокусом и центром кривизны, то изображение получается обратное, увеличенное и действительное (рис. 428 и 429); если же он находится на расстоянии $R\,(=C)$ от зеркала, то изображение получается одинаковых размеров с предметом, хотя и обратное, и лежит также на расстоянии

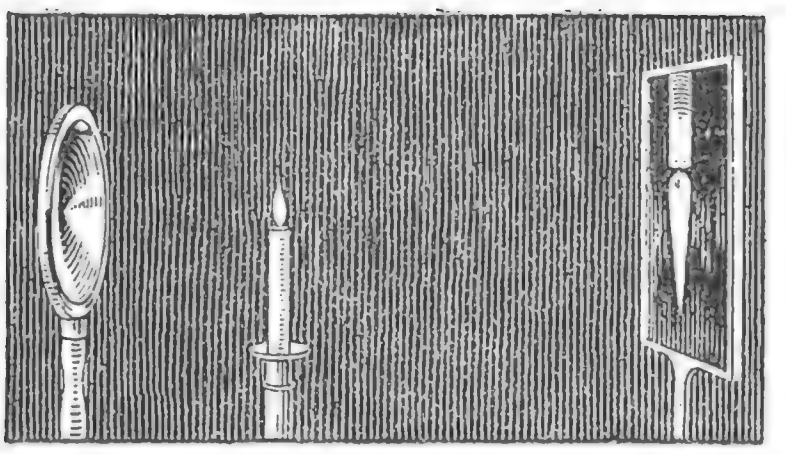


Рис. 428. Действительное изображение свечи, образованное вогнутым зеркалом.

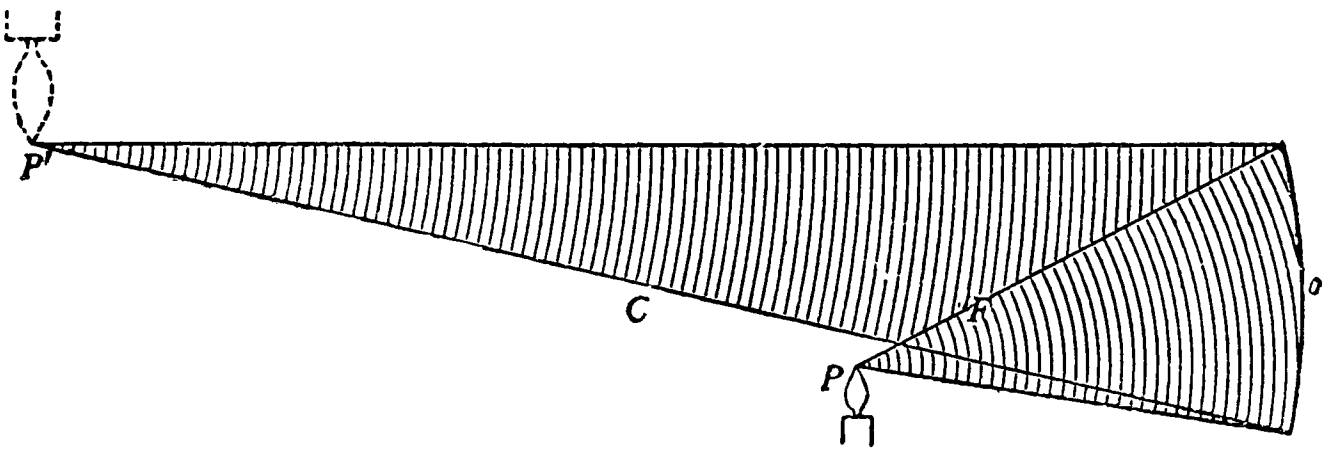


Рис. 429. Способ образования действительного изображения вогнутым зеркалом.

R от зеркала; при перемещении предмета в сторону от зеркала изображение перемещается от точки C до фокуса F, оставаясь все время действительным, обратным и уменьшенным. Для того чтобы опре-

делить фокусное расстояние, лучше всего найти, где получается изображение какого-нибудь отдаленного предмета.

Отсюда мы приходим к заключению, что вогнутое зеркало обладает точно такими же оптическими свойствами, как и выпуклая чечевица. Объясняется это тем, что подобно последней вогнутое зеркало всегда у м е н ь ш а е т кривизну волн. Поэтому и в этом случае применимы все выведенные раньше формулы и способы построений (см. рис. 430).

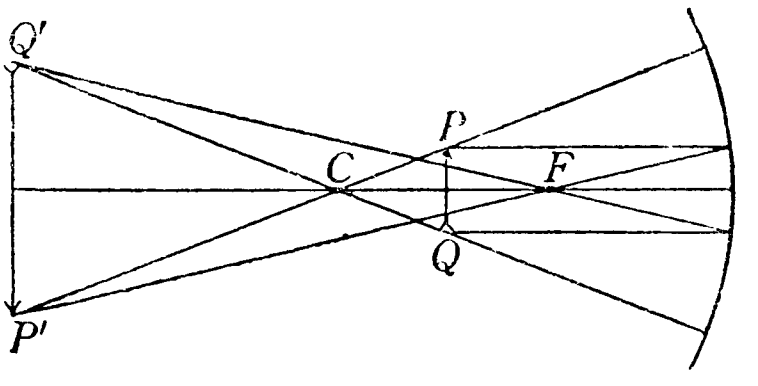


Рис. 430. Геометрический способ нахождения действительного изображения в вогнутом зеркале.

Резюме. **Вогнутые зеркала и выпуклые чечевицы обладают одинаковыми оптическими свойствами (см. формулы, стр. 331).**

Выпуклые зеркала и вогнутые чечевицы обладают одинаковыми оптическими свойствами (см. формулы, стр. 331).

Вопросы и задачи.

1. Какое изображение получается в плоском зеркале?

2. Объясните с помощью чертежа, почему в воде получается перевернутое изображение деревьев, растущих на противоположном берегу озера

3. Человек стоит прямо перед плоским зеркалом, которое значительно выше его. Затем зеркало наклоняют по направлению к человеку до тех пор, пока оно не образует с горизонтальной плоскостью угол в 45°. Человек все-таки продолжает видеть себя в зеркале во весь рост. Какое положение при этом занимает его изображение?

4. Докажите, сделав необходимые построения, что человек может видеть себя в зеркале во весь рост только в том случае, когда зеркало доходит до половины его роста. Оказывает ли в этом случае какое-нибудь влияние расстояние человека от зеркала?

5. Какое изображение получается в выпуклом зеркале? Почему это изображение не может быть больше самого предмета?

6. Можно ли в выпуклом зеркале получить обратное изображение? Почему?

7. Почему в изображении человеческого лица в выпуклом зеркале нос оказывается слишком больших размеров по сравнении с ушами?

8. При каких условиях в вогнутом зеркале получается действительное изображение? При каких — мнимое? При каких условиях получается изображение увеличенное? При каких — уменьшенное? При каких условиях получается прямое изображение? При каких — обратное?

9. Предмет высотой в 5 *см* находится на расстоянии 50 *см* от вогнутого зеркала с фокусным расстоянием, равным 30 *см*. Где находится изображение и каковы его размеры?

10. Изображение свечи, находящейся на расстоянии 20 *см* перед вогнутым зеркалом, получается на расстоянии 50 *см* перед зеркалом. Чему равняется радиус зеркала?

ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ.

449. Фотографическая камера. Если проделать булавкой отверстие в куске картона (рис. 431), то с помощью такого простого приспособления можно получить достаточно отчетливое изображение пламени свечи (рис. 431) на поставленном перед отверстием экране. Заменив экран фотографической пластинкой, мы получим простей-

шую фотографическую камеру без объектива, с помощью которой при достаточно долгой экспозиции можно иметь хорошие снимки.

Если мы попытаемся сделать изображение более ярким, расширив отверстие, то оно получится размытым, потому что узкие световые пучки aa', a_2a_2' и т. д. превращаются в конусы, основания которых

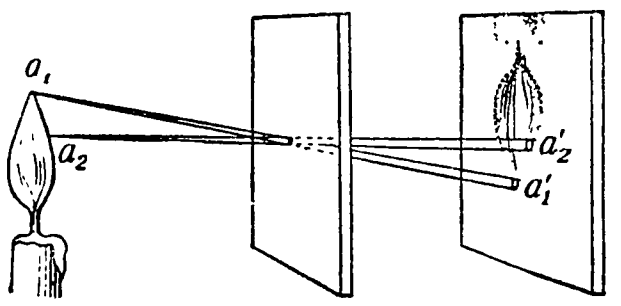


Рис. 431. Изображение, образованное малым отверстием.

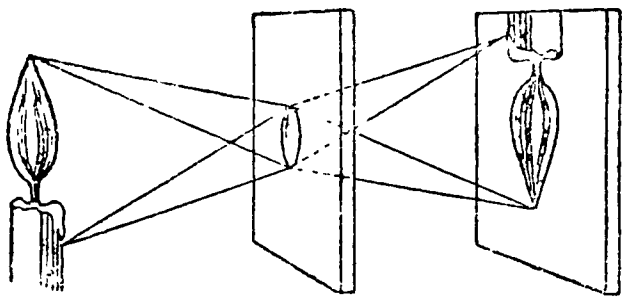


Рис. 432. Основы устройства фотографической камеры.

a', a_2' перекрываются, вследствие чего очертания изображения становятся более расплывчатыми.

Для того чтобы, не жертвуя отчетливостью очертаний, добиться увеличения яркости, достаточно вставить в отверстие чечевицу (рис. 432). Если вместо экрана вставить фотографическую пластинку, то мы получим уже настоящую фотографическую камеру с объективом (рис. 433). Однако в отличие от камеры без объектива, в которой экран может находиться на любом расстоянии от отверстия, в камере с объективом пластинка и фотографируемый предмет должны находиться в сопряженных фокусах чечевицы.

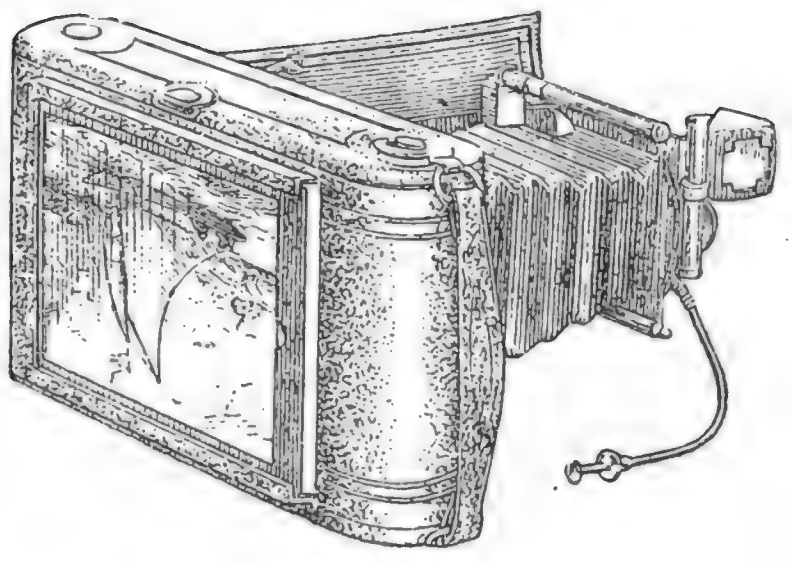


Рис. 433. Фотографическая камера.

Поместим чечевицу с фокусным расстоянием, например, в 15 *см* перед отверстием в ставне затемненной комнаты и расположим в фокальной плоскости полупрозрачный экран (например, из бумажной или полотняной кальки). На экране получится отчетливое изображение того, что находится за окном.

450. Проекционный фонарь. Проекционный фонарь в основных своих чертах представляет собой фотографическую камеру, в которой предмет и его изображение переставлены один на место другого; дело в том, что при употреблении фотографической камеры предмет находится на значительном расстоянии и его небольшое обратное изображение получается на пластинке, отстоящей от объектива немного больше, чем на фокусное расстояние. В проекционном же фонаре предмет P (рис. 434) отстоит от чечевицы L' на расстоянии, которое чуть-чуть больше ее главного фокусного расстояния, а на отдаленном экране S получается увеличенное обратное изображение. В обоих приборах оптическая часть представляет собой комбинацию чечевиц, дающую тот же эффект, как выпуклая чечевица.

Предмет P, изображение которого получается на экране, обычно представляет собой прозрачную пластинку, освещаемую мощным

источником света A. Изображение во столько раз больше предмета, во сколько раз расстояние от L' до S больше расстояния от L' до P. В качестве источника света A пользуются электрической лампой накаливания или электрической дугой.

В киноаппаратах пользуются длинной лентой или фильмом, состоящим из отдельных небольших позитивных снимков, которые

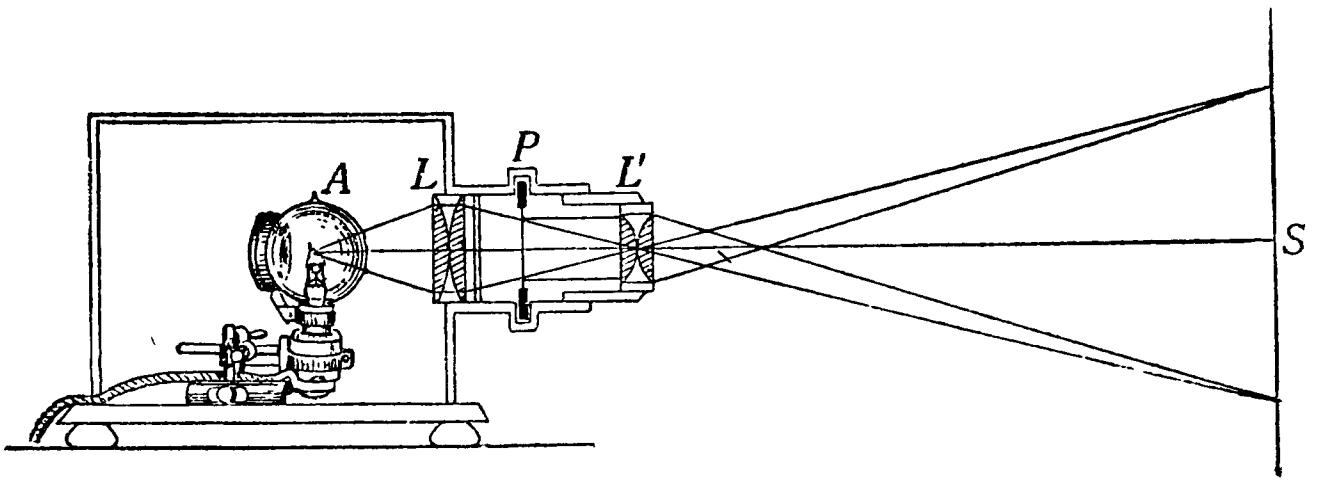


Рис. 434. Проекционный фонарь.

медленно передвигаются между собирательной чечевицей L и объективом L' (см. стр. 334).

Для возможно более сильного освещения проектируемого на экране предмета всегда пользуются собирательной чечевицей или так называемым конденсором L, концентрирующим свет на прозрачном объекте и отбрасывающим его на экран.

Для иллюстрации принципа, на котором основано устройство проекционного фонаря, направим пучок солнечного света на картинку для фонаря. Если поместить затем перед картинкой немного дальше фокусного расстояния чечевицу, то на противоположной стене комнаты получится яркое изображение картинки.

451. Глаз. Человеческий глаз представляет собой в основных чертах как бы фотографическую камеру, в которой роговая оболочка C (рис. 435), водянистая влага l и хрусталик A образуют одну чечевицу, дающую обратное изображение $P'Q'$ на сетчатой оболочке (ретина); последняя состоит из разветвлений глазного нерва и выстилает изнутри заднюю часть глазного яблока.

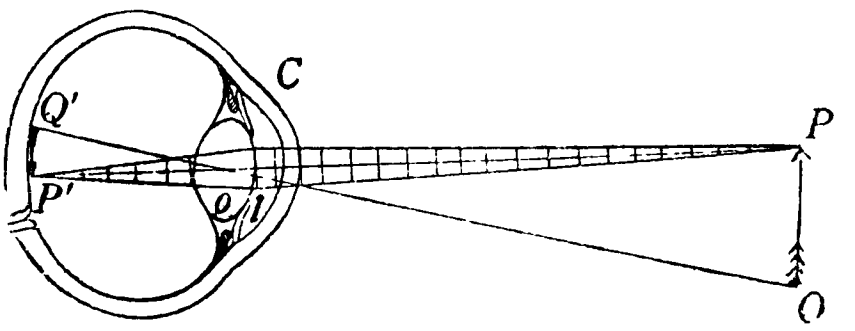


Рис. 435. Человеческий глаз.

В фотографической камере для получения изображения предметов, находящихся на различных расстояниях, пластинку придвигают к объективу или отодвигают от него. Что касается человеческого глаза, то в нем расстояние от сетчатой оболочки до чечевицы остается неизменным, и установка на различные расстояния достигается изменением фокусного расстояния системы чечевиц, производимым так, чтобы изображение попадало всегда на сетчатую оболочку. Таким образом, когда нормальный глаз совершенно не напрягается, кривизна чечевицы как раз такова, чтобы фокусировать плоские волны на ретине, т. е. поставить отдаленные предметы в условия отчетливой видимости. Однако, когда мы обращаем внимание на предметы, близко к нам расположенные, мы вызываем сокращение

мускулов, удерживающих чечевицу на месте, в результате чего чечевица становится более выпуклой, и таким образом изображение предметов, находящихся на близких расстояниях — до 2,5 — 3 *см* — от глаза, получается в фокусе. Эта способность приспособления, или а к к о м о д а ц и и, однако, весьма различна у разных людей.

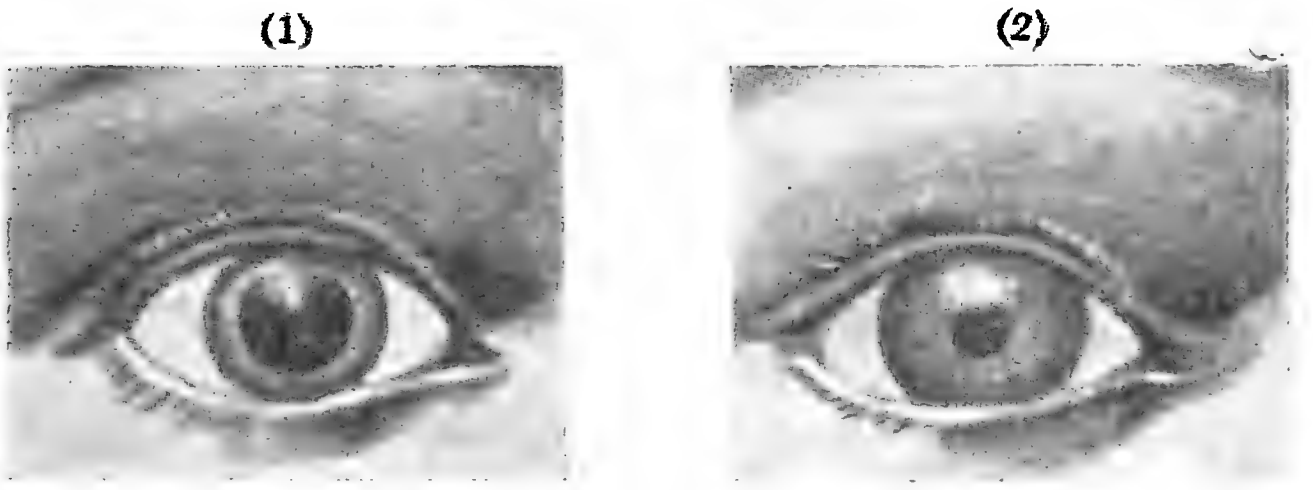


Рис. 436. Зрачок расширяется при тусклом освещении и суживается при ярком свете.

Радужная оболочка, или окрашенная часть глаза, представляет собой диафрагму, регулирующую количество света, попадающего на сетчатую оболочку (рис. 436, 1 и 2).

452. Близорукость и дальнозоркость. В случае н о р м а л ь н о г о зрения при условии, что мышцы не напряжены, параллельные лучи собираются в фокусе на сетчатой оболочке (рис. 437, 1); в случае б л и з о р у к о с т и они фокусируются п е р е д сетчатой оболочкой (рис. 437, 2), и, наконец, в случае д а л ь н о з о р к о с т и эти лучи попадают на сетчатую оболочку, п р е ж д е ч е м о н и с о б и р а ю т с я в ф о к у с е (рис. 437, 3).

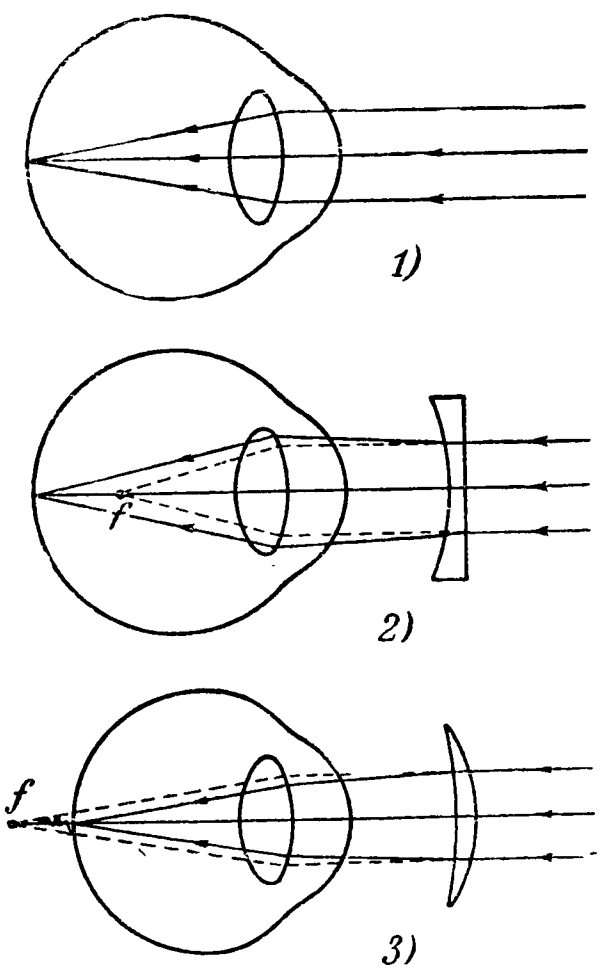


Рис. 437. Недостатки зрения.

Близорукие люди видят отчетливо только близлежащие предметы. Обычно причиной близорукости является слишком далекое расстояние сетчатой оболочки от чечевицы. Этот недостаток зрения может быть исправлен рассеивающей чечевицей, благодаря которой лучи от отдаленного предмета попадают в глаз так, как если бы они приходили от близлежащего предмета; таким образом, она частично ослабляет собирательное действие глаза (рис. 437, 2).

Дальнозоркие люди не могут без н а п р я ж е н и я г л а з видеть даже очень отдаленных предметов. Обычно причиной дальнозоркости является то, что глазное яблоко слишком коротко в части, лежащей между чечевицей и сетчатой оболочкой. Поэтому фокус лучей от б л и з р а с п о л о ж е н н ы х предметов лежит за сетчатой оболочкой, несмотря на все усилия аккомодации. Этот недостаток зрения может быть исправлен с помощью собирательного стекла, которое усиливает собирательное действие глаза (рис. 437, 3). В ста-

рости чечевица утрачивает способность аккомодации, т. е. способность становиться более выпуклой при разглядывании близких предметов; поэтому в старости для нормальных глаз требуются те же самые стекла, как и в случае настоящей дальнозоркости.

453. Кажущиеся размеры тел. Кажущийся размер тела зависит от размеров изображения, созданного на сетчатой оболочке глазной чечевицей, и, следовательно, от величины угла зрения PCQ (рис. 438).

Величина этого угла, очевидно, возрастает по мере приближения предмета к глазу (см. PCQ). Таким образом, если человек находится на расстоянии 100 *м* от глаза наблюдателя, то его изображение на сетчатой оболочке в действительности в десять раз меньше изображения того же самого человека в том случае, когда он находится на расстоянии только 10 *м*. Мы не считаем, что изображение больших размеров относится к человеку, размеры которого больше, просто только по тому, что повседневный опыт научил нас при оценке действительных размеров предметов принимать во внимание также и расстояние, на котором они находятся.

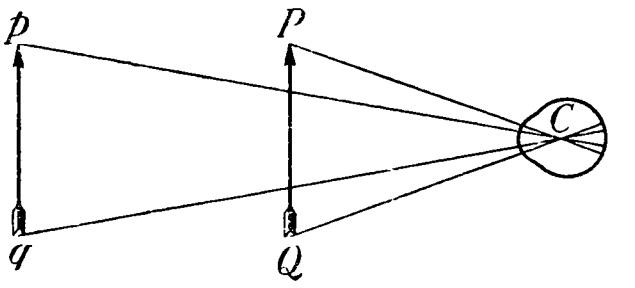


Рис. 438. Угол зрения.

Ребенку, у которого в значительной мере отсутствует отчетливое представление о расстоянии, без всякого сомнения, кажется, что человек на расстоянии 10 *м* больше человека, находящегося на расстоянии 100 *м*.

454. Расстояние наилучшего зрения. Когда мы желаем рассмотреть предмет во всех деталях, мы подносим его возможно ближе к глазу, для того чтобы по возможности увеличить размер изображения на сетчатой оболочке. Однако для размеров изображения, которое таким образом может быть получено, существует известный предел; действительно, если предмет отстоит от нормального глаза меньше чем, приблизительно, на 25 *см*, кривизна падающих волн становится настолько велика, что глазная чечевица больше не в состоянии без слишком большого напряжения сжиматься, для того чтобы привести изображение в фокус на сетчатой оболочке. Поэтому человек с нормальным зрением держит предмет, который он желает видеть совершенно отчетливо, на расстоянии около 25 *см*.

Хотя так называемое расстояние наилучшего зрения не одинаково у разных людей и может изменяться в довольно широких пределах, однако, для того чтобы сравнивать увеличения, даваемые различными оптическими приборами, необходимо было установить какую-нибудь точную величину. В качестве такой величины было выбрано расстояние в 25 *см*.

455. Увеличение, даваемое выпуклой чечевицей. Если поместить выпуклую чечевицу непосредственно перед глазом, то предмет может быть поднесен к глазу на расстояние, которое значительно меньше 25 *см*, и при этом будет видим столь же отчетливо, потому что кривизна волны частично или даже полностью уничтожится чечевицей, прежде чем световые лучи достигнут глаза.

Для того чтобы использовать наилучшим образом чечевицу в качестве увеличительного стекла, мы должны как можно ближе поднести ее к глазу с целью захватить возможно более широкий конус лучей и затем поместить предмет на расстоянии от чечевицы, равном ее главному фокусному расстоянию, для того чтобы волны становились плоскими, пройдя сквозь чечевицу. При этих условиях лучи будут фокусироваться на сетчатой оболочке глаза без малейшего усилия со стороны последнего.

В этом случае углом зрения будет угол PCQ (рис. 439 (1)); действительно, так как выходящие волны — плоские, лучи, проходящие через точки PQ и через центр глаза, параллельны прямым Pc и Qc. Однако, если бы не было чечевицы и если бы предмет находился на расстоянии 25 *см* от глаза, то углом зрения был бы небольшой угол pcq (рис. 439 (2). Увеличение, даваемое простой чечевицей, обусловлено таким образом тем, что с ее помощью можно отчетливо видеть предмет, когда он находится весьма близко к глазу. Благодаря этому получается угол зрения, увеличивающий размеры изображения на сетчатой оболочке. Чем меньше фокусное расстояние чечевицы, тем ближе к глазу может быть поднесен рассматриваемый предмет и, следовательно, тем больше будет угол зрения или увеличение.

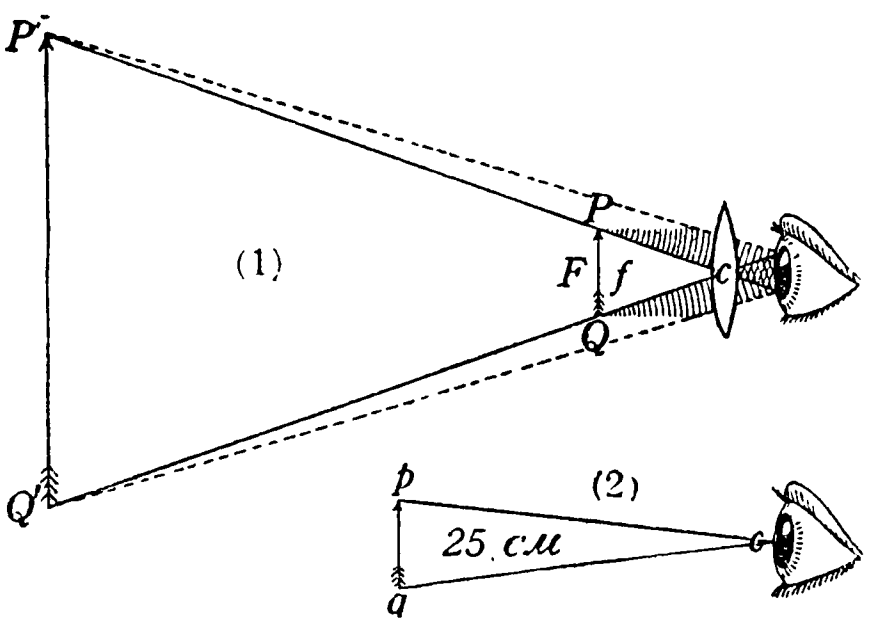


Рис. 439. Увеличение, даваемое чечевицей.

Отношение двух углов PCQ и pcq равно приблизительно $\frac{25}{f}$, где f обозначает фокусное расстояние чечевицы, выраженное в сантиметрах. Таким образом, увеличение чечевицы или простого микроскопа представляет собою отношение угла, под которым наблюдатель видит изображение, к углу, под которым предмет виден невооруженным глазом на расстоянии 25 *см*. Поэтому увеличение простой чечевицы равно $\frac{25}{f}$. Так что, если фокусное расстояние чечевицы равно 2,5 *см*, то она дает 10-кратное линейное увеличение предмета, находящегося в ее главном фокусе. Если же чечевица обладает фокусным расстоянием, равным 1 *см*, то она будет давать 25-кратное увеличение и т. д.

456. Увеличение, даваемое астрономическим телескопом. В астрономическом телескопе объектив, или передняя чечевица, образует в своем главном фокусе изображение $P'Q'$ предмета, который обычно находится на очень далеком расстоянии. Изображение можно рассматривать невооруженным глазом с расстояния в 25 *см* (рис. 440). При рассматривании очень удаленного предмета невооруженным глазом угол зрения будет PoQ; при помощи объектива, фокусное расстояние которого значительно превосходит 25 *см* (оно составляет около 2 000 *см* в случае

большого телескопа Иеркской обсерватории), угол зрения PEQ' многим больше угла PoQ, т. е. одного объектива достаточно для увеличения угла зрения. Однако на практике это изображение рассматривается не невооруженным глазом, а увеличивается в несколько раз с помощью простого короткофокусного увеличительного стекла, называемого о к у л я р о м (рис. 411), помещаемого так, чтобы изображение находилось в его фокусе.

Увеличение угла зрения $P'EQ'$ (рис. 440), производимое одним только объективом, прямо пропорционально фокусному расстоянию последнего и

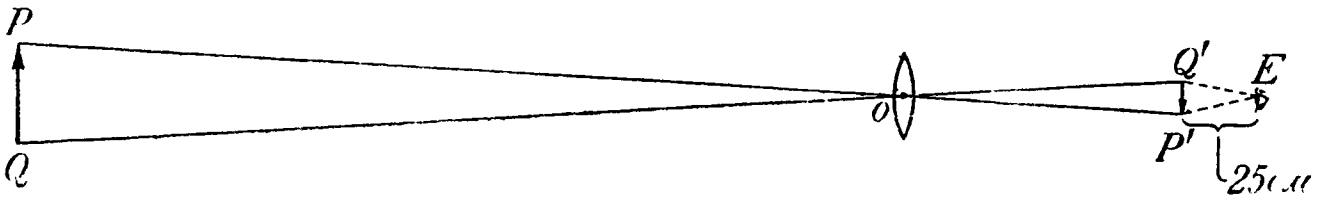


Рис. 440. Увеличение объектива телескопа равно $\frac{F}{25}$.

составляет $\frac{F}{25}$. Действительно, угол PoQ = углу $P'oQ'$. Принимая короткий отрезок $Q'P'$ за дугу окружности, мы видим, что углы $Q'EP'$ и $Q'oP$ ($= PoQ$) обратно пропорциональны соответствующим радиусам, т. е.

$$\frac{\text{угол зрения с объективом}}{\text{угол зрения без объектива}} = \frac{\text{фокусное расстояние объектива}}{25}.$$

Следовательно, увеличение, даваемое одним объективом, равняется $\frac{F}{25}$.

В Иеркском телескопе происходит увеличение угла зрения в $\frac{2\,000}{25} = 80$ раз.

Как мы видели в § 455, простое увеличительное стекло увеличивает угол зрения в $\frac{25}{f}$ раз, где f обозначает фокусное расстояние окуляра; следовательно, полное увеличение, даваемое обеими чечевицами, равно $\frac{F}{25} \cdot \frac{25}{f} = \frac{F}{f}$. Таким образом, увеличение, даваемое астрономическим телескопом, представляет собою частное от деления фокусного расстояния объектива на фокусное расстояние окуляра. Следовательно, для того чтобы получить весьма большое увеличение, следует взять объектив с фокусным расстоянием возможно больших размеров и очень короткофокусный окуляр. Фокусное расстояние объектива составляет около 19 *м*, а его диаметр равняется 1 *м*. Большой диаметр позволяет собрать очень большое количество света, благодаря чему небесные тела видны более отчетливо.

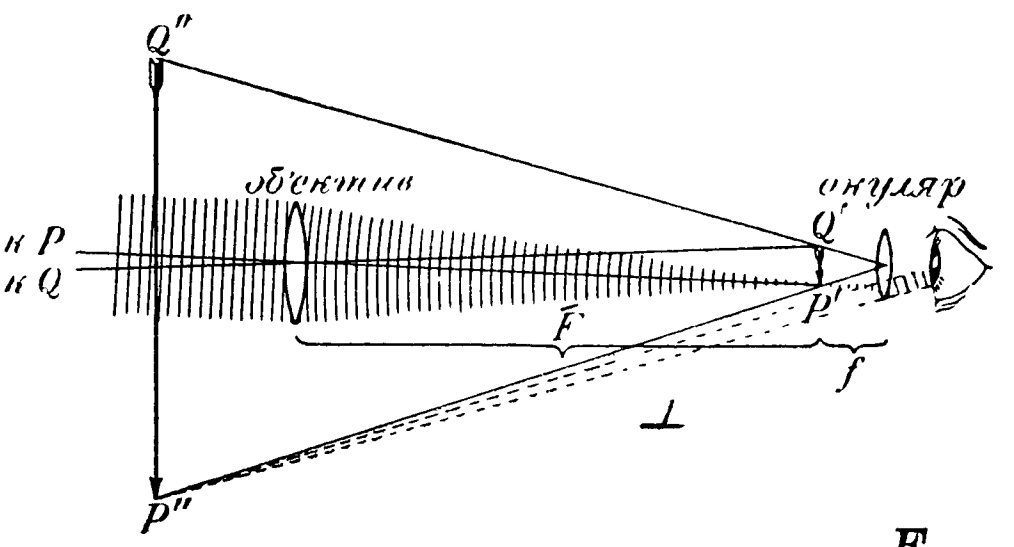


Рис. 441. Увеличение телескопа равно $\frac{F}{f}$.

Фокусное расстояние окуляров иногда не превосходит 5,— 6 *мм*. Так, например, Иеркский телескоп с окуляром, фокусное расстояние которого равно 6 *мм*, дает увеличение почти в 3 000 раз.

457. Увеличение, даваемое сложным микроскопом. Сложный микроскоп напоминает телескоп тем, что передняя чечевица или объектив создает действительное изображение в фокусе окуляра. Изображение $P'Q'$ (рис. 442), созданное объективом, во столько раз больше самого предмета PQ, во сколько раз D — расстояние от объектива до изображения — больше D_0 — расстояния от объектива до предмета (см. § 441). Так как окуляр увеличивает это изображение в $\frac{25}{f}$ раз, общее увеличение, даваемое сложным микроскопом, равняется $\frac{D_i}{D_0} \times \frac{25}{f}$. Обычно D_i практически совпадает с длиной L

тубуса микроскопа, а D_0 — с фокусным расстоянием F объектива. В таком случае увеличение, даваемое сложным микроскопом, выражается формулой $\frac{25L}{Ff}$.

Это соотношение показывает, что для достижения с помощью сложного микроскопа максимального увеличения следует всемерно уменьшить фокусное расстояние как объектива, так и окуляра и по возможности удлинить тубус. Так, например, если в микроскопе фокусное расстояние как окуляра, так и объектива равняется 6 *мм*, а длина тубуса составляет 15 *см*, то даваемое им увеличение достигает

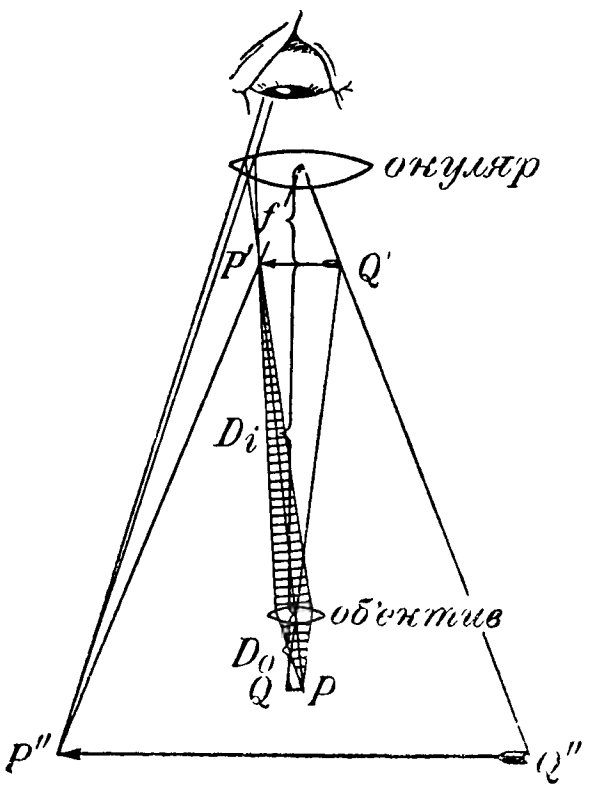


Рис. 442. Сложный микроскоп.

$$\frac{25 \times 15}{0{,}6 \times 0{,}6} = 1042.$$

Иногда пользуются также увеличениями в 2 500 или 3 000, однако пойти еще многим дальше становится невозможно, потому, что изображение получается слишком слабым.

458. Театральный бинокль. Вследствие большого числа чечевиц, из которых состоит земная труба, последняя слишком громоздка и неудобна для многих целей; поэтому очень часто ее заменяют театральным биноклем (рис. 443). Этот прибор состоит из объектива, похожего на телескопический, и из окуляра, представляющего собой вогнутую чечевицу с таким же фокусным расстоянием, как и глаз наблюдателя.

Таким образом, задачей окуляра является уничтожение действия, производимого на световые лучи глазной чечевицей. Благодаря этому изображение, создаваемое объективом, получается непосредственно на сетчатой оболочке. Это значит, что угол зрения $P'cQ'$ $(= P''cQ'')$, получающийся при рассматривании предмета через театральный бинокль, во столько раз больше угла зрения PCQ $(= P''CQ'')$ для невооруженного глаза, во сколько раз фокусное расстояние CR объектива больше фокусного расстояния cR глаза, т. е. изображение, создаваемое на сетчатой оболочке объектива, во столько раз больше того изображения, которое получается в невоору-

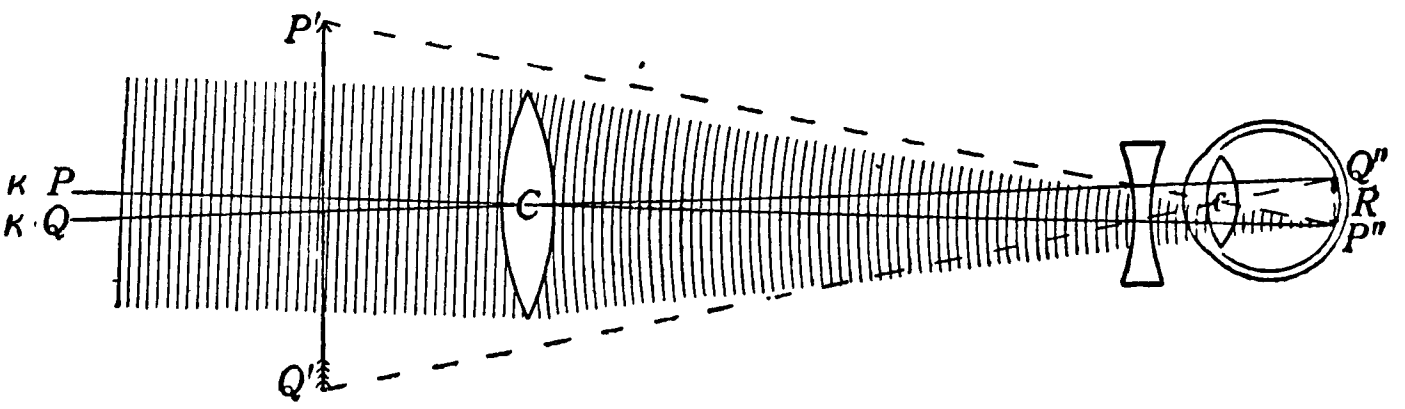
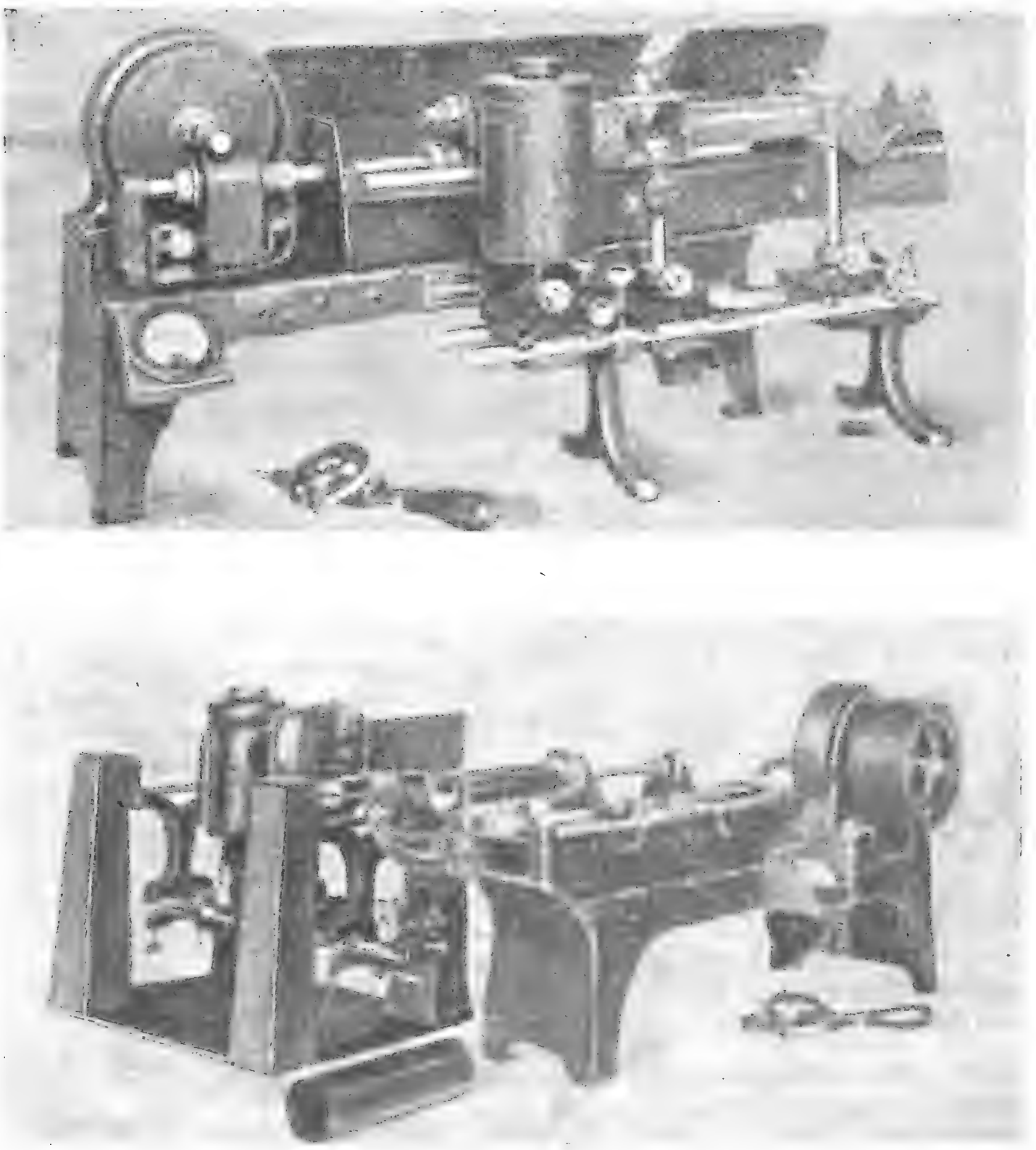


Рис. 443. Театральный бинокль.

женном глазу, во сколько раз CR больше cR. В виду того, что фокусные расстояния глаза и окуляра равны, увеличение, даваемое театральным биноклем, также как и в случае астрономической трубы, представляют собой отношение фокусных расстояний объектива и окуляра. Предметы при рассматривании их в театральный бинокль не кажутся перевернутыми, потому что на сетчатой оболочке, так же как и для невооруженного глаза, получается обратное изображение.

459. Стереоскоп; бинокулярное зрение. Если рассматривать предмет обоими глазами, то изображения, получающиеся на обеих сетчатых оболочках, немного отличаются друг от друга, так как оба глаза благодаря

тому, что они находятся на некотором расстоянии, видят предмет под различными углами. Этим и объясняется, почему при рассматривании предмета или пейзажа обоими глазами создается впечатление глубины или телесности, исчезающее, если закрыть один глаз. Стереоскоп представляет собой прибор, сообщающий фотографиям рельефность, присущую впеча-



ПЕРЕДАЧА ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО ПРОВОДАМ.

На верхнем рисунке изображен передаточный аппарат, на нижнем — приемник. Изображения, отпечатки пальцев, надписи и пр., подлежащие передаче, наложены на прозрачную пленку, навитую на горизонтальный цилиндр, находящийся за центральной лампой. Слева работает мотор; он вращает цилиндр и в то же время продвигает его при каждом обороте вперед на 0,025 *см*. Слабый пучок света проходит через пленку, падает на фото-элемент и вызывает изменения тока, пропорциональные свету, дошедшему до фото-элемента. В приемнике колебания тока колеблют интенсивность слабого пучка света, падающего на вращающуюся и движущуюся поступательно пленку. Таким образом создается изображение.

тлению от бинокулярного зрения. Для этого с какого-нибудь предмета делаются два снимка с немного различных точек зрения. Фотографии устанавливаются в *A* и *B* (рис. 444), где они одновременно рассматриваются обоими глазами сквозь призматические чечевицы *m* и *n*. Благодаря этим призматическим чечевицам, в точке *C* получаются налагающиеся друг на

друга увеличенные изображения (два изображения); накладываются друг на друга потому, что чечевицы действуют как призмы; увеличенными же они получаются потому, что те же чечевицы действуют одновременно как простые увеличительные стекла. В результате наблюдатель видит как бы одну фотографию; однако получающееся изображение отличается от обыкновенной фотографии тем, что она имеет вид предмета, который получается при бинокулярном зрении.

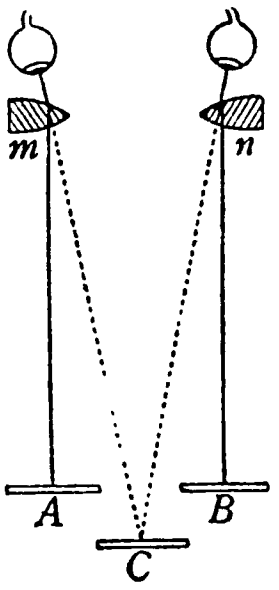


Рис. 444. Основы устройства стереоскопа.

Театральный бинокль имеет по сравнению с земной трубой то преимущество, что позволяет использовать все выгоды бинокулярного зрения, так как состоит из двух систем стекол, по одной для каждого глаза.

460. Призматический бинокль. Большим недостатком театрального бинокля является то, что у него очень малое поле зрения. У земной трубы поле зрения больше, но зато другим неудобством является ее чрезмерная длина. Однако недавно получил распространение оптический прибор, получивший название призматического бинокля (рис. 445), который соединяет удобные размеры театрального бинокля с широким полем зрения земной трубы. Незначительность его размеров достигается тем, что путь, проходимый светом, удлиняется благодаря призмам, создающим полное внутреннее отражение, как показано на рисунке. При этом отражении изображение переворачивается, в результате чего в фокусе окуляра получается действительное прямое изображение. Таким образом, этот прибор в основных своих чертах является астрономической трубой, в которой только изображение переворачивается благодаря отражению; кроме того, труба эта укорочена, так как свет проходит больший путь благодаря отражению от призм.

Другим преимуществом призматического бинокля является то, что расстояние между обоими объективами больше расстояния между глазами; поэтому здесь получается более значительное стереоскопическое действие, чем в случае невооруженных глаз или при употреблении театрального бинокля.

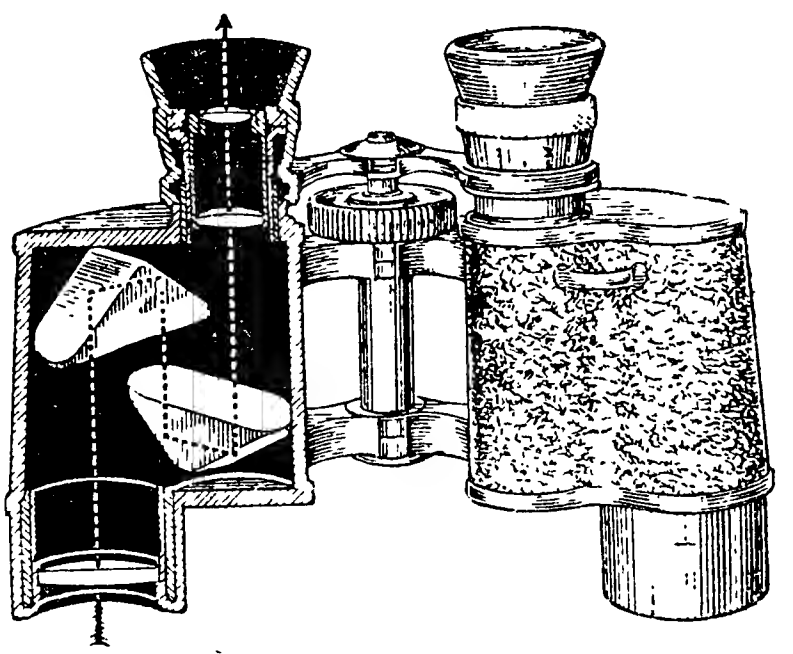


Рис. 445. Призматический бинокль.

Резюме. **Фотографическая камера, проекционный фонарь и человеческий глаз создают действительные изображения.**

Увеличение, даваемое микроскопом, телескопом, биноклем и лупой, объясняется тем, что эти приборы увеличивают угол зрения.

Увеличение, даваемое отдельной чечевицей, выражается частным от деления 25 *см* на фокусное расстояние чечевицы.

Увеличение, даваемое телескопом и биноклем, равно отношению фокусного расстояния объектива к фокусному расстоянию окуляра.

Увеличение, даваемое сложным микроскопом, выражается произведением из увеличений, даваемых объективом и окуляром.

Вопросы и задачи. [1]

1. Если в фотографической камере без объектива, длина которой равняется 20 *см*, получается изображение размерами в 7,5 *см* от здания высотой в 15 *м*, то на каком расстоянии от камеры находится это здание?

2. Какой высоты дерево, если на расстоянии 60 *м* от фотографической камеры с фокусным расстоянием в 10 *см* получается изображение размерами в 2,5 *см*? (Предположите, что изображение получается в фокальной плоскости.)

[1] Дополнительные вопросы и задачи к главе XIX приведены в приложении.

3. Какой величины получится изображение того же самого дерева в фокальной плоскости чечевицы, фокусное расстояние которой равно 20 *см*?

4. Объясните устройство изображенного на рис. 446 видоискателя для фотографической камеры: F — главный фокус объектива, F' — главный фокус окуляра.

5. Объясните, почему небольшой камерой с неизменным фокусным расстоянием можно удовлетворительно фотографировать как близкие, так и далекие предметы?

6. В проекционном фонаре фокусное расстояние равно 30 *см*. Как далеко за чечевицей должна находиться картинка, для того чтобы получилось отчетливое изображение на экране, отстоящем от фонаря на 8 *м*?

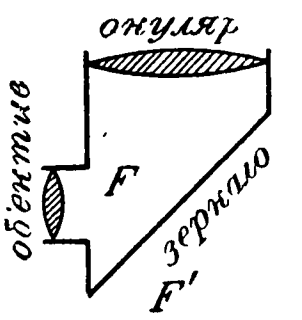


Рис. 446. Видоискатель фотографической камеры.

7. Какое изображение получается на сетчатой оболочке: прямое или обратное?

8. Почему зрачки наших глаз расширяются в темном погребе и суживаются при ярком солнечном свете? Почему фотограф пользуется для фотографирования движущихся предметов широкой диафрагмой?

9. Какие стекла нужны для исправления близорукости? Объясните с помощью чертежа.

10. Как определить, является ли данное стекло для очков собирательным или рассеивающим?

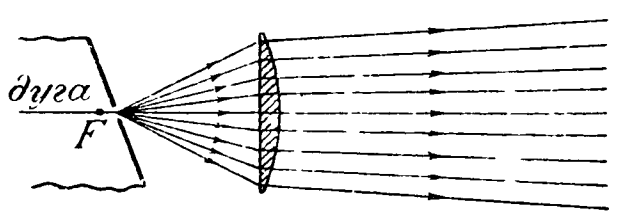


Рис. 447. Основы устройства точечного источника света.

11. Какое увеличение дает чечевица с фокусным расстоянием в 6 *мм*, если пользоваться ею как простым увеличительным стеклом?

12. На рис. 447 изображен театральный прожектор, предназначенный для освещения небольших участков сцены. Куда следует передвинуть дугу для освещения большей площади. (F — главный фокус плоско-вогнутой чечевицы.)

13. В телескопе фокусное расстояние объектива равно 10 *м*, а фокусное расстояние окуляра — 2,5 *см*. Какое увеличение дает этот телескоп?

ГЛАВА XX.

ЯВЛЕНИЯ ЦВЕТА.

ЦВЕТ И ДЛИНА ВОЛНЫ.

461. Длины волн различных цветов. Образуем мыльную пленку (пузырь), которая закрывала бы отверстие обыкновенного чайного стакана; для этого необходимо, чтобы мыльный раствор и стакан были возможно чище. Затем, пропустив пучок солнечного света или от проекционного фонаря сквозь красное стекло A, направим его на мыльную пленку, а на пути отраженных лучей поставим экран (см. рис. 448). Кроме того, поместим перед экраном выпуклую чечевицу с фокусным расстоянием от 15 до 30 *см* таким образом, чтобы на экране получилось изображение пленки; для этого пленка и экран должны находиться в двух сопряженных фокусах чечевицы. На экране образуется ряд таких же красных и черных полос, какие описывались в § 428, благодаря интерференции двух световых пучков, приходящих от передней и задней поверхностей клинообразной пленки. Поставим теперь рядом с красным стеклом зеленое так, чтобы половина пучка проходила сквозь одно стекло, а другая половина — сквозь второе, как показано на рис. 448. Мы увидим на экране рядом расположенные полосы: красные и черные с одного края изображения, зеленые и черные с другого; легко, однако, заметить, что расстояние между темными полосами у зеленого края меньше, чем у красного; действительно, семь полос в той половине изображения, которая получается от лучей, прошедших зеленое стекло, занимают столько же места, как шесть полос в другой половине.

Мы видели из рис. 388, что расстояние между двумя соседними темными полосами соответствует увеличению толщины пленки на полволны. Тот же опыт можно произвести, если просто глядеть сквозь красное и зеленое стекла на мыльный пузырь, расположенный так, чтобы отраженный им белый свет попадал в глаз наблюдателя; на основании того факта, что расстояние между темными полосами у красного края больше расстояния между полосами у зеленого края, мы заключаем, что красный свет обладает большей длиной волны, чем зеленый. В нижеследующей таблице сопоставлены длины волн, числа волн, укладывающихся в одном сантиметре, и числа колебаний, соответствующие различно окрашенным частям спектра:

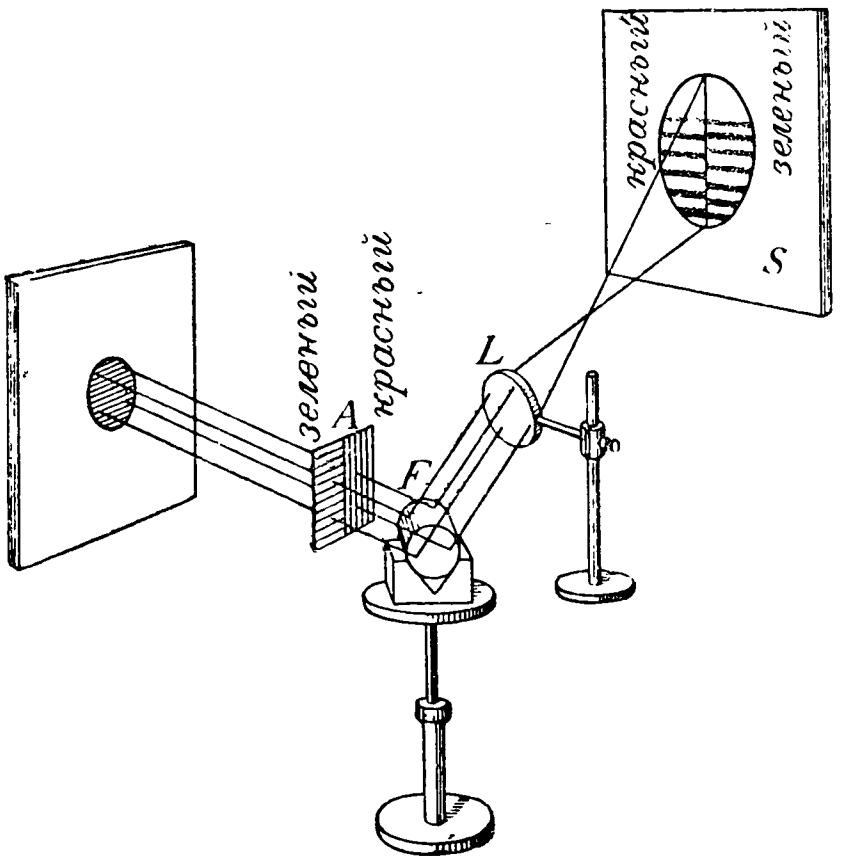


Рис. 448. Получение на экране колец от мыльного пузыря.

ЦВЕТ	Длина волны в *см*	Число волн, укладыв. в одном *см*	Частота (количество волн, испускаемых в 1 секунду).
Фиолетовый	0,000041	24 440	$7{,}32 \cdot 10^{14}$
Синий	0,000047	21 300	$6{,}39 \cdot 10^{14}$
Зеленый	0,000052	19 200	$5{,}76 \cdot 10^{14}$
Желтый	0,000057	17 500	$5{,}25 \cdot 10^{14}$
Оранжевый	0,000062	16 100	$4{,}83 \cdot 10^{14}$
Красный	0,00071	14 100	$42{,}3 \cdot 10^{14}$

Уберем с пути лучей цветные стекла. Красные и зеленые полосы заменятся целым рядом широких полос, ярко окрашенных в различные цвета. Объясняется это явление тем, что световые лучи различной длины волны образуют интерференционные полосы в различных местах экрана. Обратите внимание на то, что верхние края полос (нижние края в обратном изображении) имеют красноватый оттенок, а нижние края — голубоватый. Объяснение этого явления отложим до § 470.

462. Рассеяние (дисперсия); ложная природа белого света. Направим на призму пучок солнечного света, прошедший сквозь узкую щель (см. рис. 449). Попадающий на призму пучок белого света разделяется ею на пучки красного, желтого, зеленого, синего и фиолетового света, причем каждый свет постепенно почти незаметно переходит в другой. Такая полоса, окрашенная в различные цвета, называется спектром.

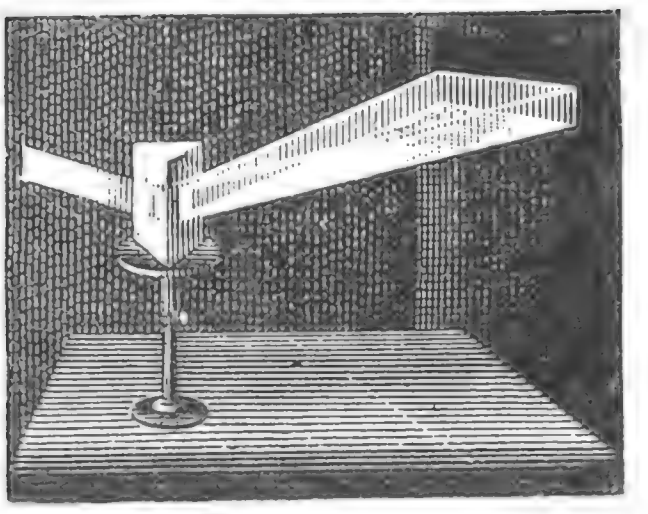


Рис. 449. Рассеяние белого света призмой.

На основании этого опыта мы приходим к заключению, что белый свет представляет собой смесь всех

цветов спектра от красного до фиолетового включительно.

463. Окраска тел в белом свете. В предыдущем опыте поместим кусок красного стекла на пути окрашенного светового пучка. При этом исчезнет весь спектр за исключением красного участка; другими словами, все длины волн, кроме той, которая соответствует красному цвету, будут поглощены стеклом. Проделаем то же самое с зеленым стеклом. На этот раз зеленая часть спектра останется без изменений, в то время как в других частях спектра произойдет заметное ослабление интенсивности. Следовательно, зеленое стекло должно поглощать длины волн, соответствующие зеленому цвету, в значительно меньшей степени, чем те длины волн, которые соответствуют красному и синему. Поставим теперь на пути лучей оба стекла одно позади другого. Спектр почти полностью исчезнет, потому что красное стекло поглотило все лучи за исключением красных, а зеленое стекло поглотило и красные лучи.

Отсюда мы заключаем, что цвет, который тело имеет при обыкновенном дневном свете, определяется теми длинами волн, которые не поглощаются телом. Так, например, если тело представляется при дневном свете белым, то происходит это вследствие того, что тело одинаково сильно отражает или беспорядочно рассеивает световые лучи всех длин волн. Поэтому и свет, от этого предмета попадающий в глаз, имеет тот же самый «спектральный состав», как и дневной или солнечный свет. Однако, если тело представляется красным в дневном свете, то это значит, что оно поглощает красные лучи падающего на него белого света в меньшей степени, чем другие лучи; таким образом, в свете, диффузно отраженном от этого тела, относительное содержание красных лучей больше, чем в обыкновенном свете. Точно так же тело кажется желтым, зеленым или синим, когда оно поглощает один из этих цветов в меньшей степени, чем остальные цвета, содержащиеся в белом свете, в результате чего в глаза попадают преимущественно лучи определенной длины волны.

464. Цвет тел в окрашенном свете. Если тело, представляющееся при солнечном свете белым, поместить в красную часть спектра, то оно покажется красным, в синей части спектра оно будет синим и т. д. Эти факты служат подтверждением выводов последнего параграфа о том, что белое тело одинаково сильно рассеивает все цвета спектра.

Поднесем моток красной шерсти к синему концу спектра. Он будет казаться почти черным. В красном конце спектра он покажется ярко-красным. Точно так же моток синей шерсти будет казаться почти черным во всех цветах спектра за исключением синего, где он будет обладать своим собственным цветом.

Явления эти, очевидно, обусловлены тем, что, например, красная шерсть сильно рассеивает красные лучи и почти полностью поглощает все остальные. Поэтому, если держать ее в синей части спектра, то она будет посылать глазу наблюдателя совсем мало света, потому что на нее совершенно не падают красные лучи.

Погрузите комок ваты в насыщенный раствор поваренной соли; выжмите затем часть раствора и облейте вату крепким спиртом. Зажгите его, и не которое время (минуту или две) вата будет гореть широким пламенем ярко-желтого цвета. Затем в темной комнате осветите светом этого натриевого пламени таблицу, на которой изображены шесть основных цветов спектра. При этом окажется, что только желтый цвет сохраняет свою естественную окраску.

Голубовато-зеленое стекло, из которого сделаны колпаки для так называемого д н е в н о г о электрического освещения, поглощает избыток красного и желтого света, испускаемого нитью; поэтому, хотя общее количество света, получаемого от нити, и уменьшается, однако различные цвета, проходящие сквозь стекло, оказываются смешанными почти в тех же самых пропорциях, как и в дневном свете. Поэтому предметы при свете такой лампы представляются так же окрашенными, как и при дневном свете.

465. Сложные цвета. Из предыдущего никоим образом не следует, что все цвета, за исключением белого, соответствуют одной определенной длине волны, потому что от смеси нескольких цветов, соответствующих различным длинам волн, глаз может получить то же самое впечатление, как и от одной определенной длины волны. Проверить это на опыте проще всего с помощью прибора, называемого цветовым диском Н ь ю т о н а (рис. 450). В этом приборе диск, разделенный на секторы, различным образом окрашенные, приводится в столь быстрое вращение, что глаз как бы одновременно воспринимает их окраску.

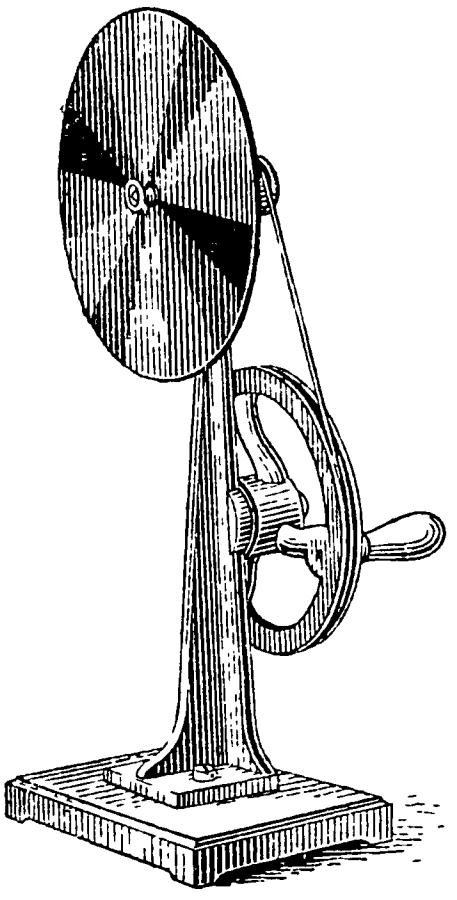


Рис. 450. Цветовой диск Ньютона.

Если одна половина диска красная, а другая половина зеленая, то вращающийся диск кажется желтым, причем цвет этот весьма близок к желтому цвету в спектре. Если смешивать таким же образом зеленый и фиолетовый цвета, то получится впечатление голубого цвета. Хотя глазом и не отличить цветов, получаемых при смешении от соответствующих спектральных цветов, однако ясно, что по физическому своему строению они совершенно различны: в то время как спектральный цвет состоит из волн одной вполне определенной длины, цвета, происходящие от смешения, состоят из волн различной длины. Поэтому спектральные цвета называются простыми, а все остальные — сложными. Для того чтобы решить, является ли цвет какого-либо предмета простым или сложным, достаточно посмотреть на него сквозь призму. Если он сложный, то цвета разделятся и дадут для каждого цвета отдельное соответствующим образом окрашенное изображение предмета. В случае же простого цвета предмет при рассматривании его сквозь призму будет казаться таким же, как и при отсутствии призмы.

Смешивая цвета описанным выше способом, мы можем получить много таких цветов, которые отсутствуют в спектре. Так, например, смесь красного с синим дает пурпуровый или густо-малиновый цвет, смесь черного с красным, оранжевым или желтым дает различные оттенки коричневого. Цвет леванды получится, если смешать семь частей белого с восемью частями синего и одной частью красного; лиловый — смешением двух частей белого с одной частью красного и тремя частями синего; оливковый — смешением одной части черного с двумя частями зеленого и одной частью красного.

466. Дополнительные цвета. Так как белый свет является ком-

бинацией всех цветов от красного до фиолетового включительно, то следовало бы ожидать, что в том случае, когда один или несколько этих цветов отсутствуют, мы получим окрашенный свет.

Для проверки этого на опыте пропустим пучок солнечных лучей сквозь щель S, призму P и чечевицу L и поставим дальше на пути лучей экран S (рис. 451). В плоскости RV, сопряженной со щелью, образуется спектр, а на экране при установке его в положении, сопряженном с плоскостью ab призмы, получится белое пятно. Поставим на пути лучей в R кусок картона так, чтобы он отрезал красную часть спектра. Пятно на экране S окрасится в яркий оттенок зеленовато-синего цвета. Мы получим смешанный цвет, оставшийся после удаления красных лучей из белого света. Полученный оттенок синего цвета называется дополнительным цветом к отсутствующему красному цвету. Таким образом, дополнительными цветами называются любые два цвета, которые при смешении образуют белый цвет.

Передвинем кусок картона в синюю часть спектра V. Пятно примет сначала желтоватую окраску, если преградить путь только фиолетовым лучам; при перемещении картона пятно будет постепенно приобретать все более и более густой красноватый оттенок, по мере того как закрываются фиолетовая, синяя и зеленая части спектра.

Поставим между R и V вертикально карандаш так, чтобы он закрывал среднюю часть спектра, т. е. преграждал путь желтым и зеленым лучам. Оставшиеся красные, синие и фиолетовые лучи окрасят пятно в яркий пурпуровый цвет. Во всех случаях пятно на экране окрашивается в цвет, дополнительный к тому, который был удален.

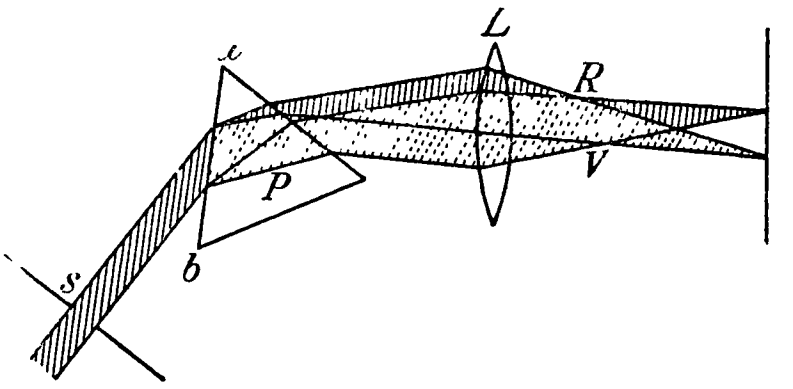


Рис. 451. Образование белого света из спектральных цветов.

467. Усталость сетчатой оболочки. Смотрите пристально в течение не менее 20 — 30 секунд на определенную точку тела, окрашенного в какой-либо яркий, например, красный цвет. Затем посмотрите на белую стену или лист белой бумаги. Вы увидите на белой плоскости изображение тела, но окрашенное в цвет, являющийся дополнительным к его настоящему цвету.

Явление это, обусловленное так называемой усталостью сетчатой оболочки, объясняется тем, что хотя белая поверхность посылает глазу световые волны всех цветов, однако восприимчивость глаза к тому цвету, на который он смотрел раньше, оказывается притупившейся, вследствие чего в цветовом впечатлении, вызываемом белым светом, данный цвет отсутствует; поэтому получающееся цветовое впечатление соответствует цвету, который является дополнительным к первоначальному цвету.

Изучение спектральных цветов описанным способом показывает, что следующие цвета являются дополнительными:

красный	оранжевый	желтый	фиолетовый	зеленый
синевато-зеленый.	зеленовато-синий	синий	зеленовато-желтый	малиновый

468. Цвета пигментов (красящих веществ). Если смешать желтый цвет с соответствующим оттенком синего цвета, то получится белый свет, потому что цвета эти являются дополнительными.

Если же к желтой краске примешать синюю, то получится зеленая смесь. Объясняется это тем, что желтый пигмент благодаря поглощению устраняет синий и фиолетовый цвета, а синий пигмент

устраняет красный и желтый, вследствие чего остается один только зеленый цвет.

Следовательно, при смешении пигментов каждый из них о т н и м а е т от белого света определенные цвета, и поэтому смесь имеет тот цвет, который не поглощается различными составными частями. Поэтому смешение п и г м е н т о в и смешение цветов, описанное в § 465, представляют собой совершенно различные явления, приводящие к совершенно разным результатам.

469. Трехцветное печатание. Опыт показывает, что можно получить любые цвета, если с помощью цветового диска (рис. 450) смешать надлежащим образом три спектральные цвета, а именно красный, зеленый и синевато-фиолетовый, которые поэтому называются т р е м я о с н о в н ы м и ц в е т а м и. Так называемые основные пигменты представляют собой просто дополнения к этим трем основным цветам. Цвета основных пигментов суть следующие: синевато-зеленый, малиновый и светло-желтый. При смешении трех основных цветов получается белый. Смешение же трех основных пигментов дает черный, потому что, взятые вместе, они отнимают от белого света все его составные части.

Способ трехцветного печатания состоит в том, что на белом фоне, т. е. на белой бумаге производится смешение трех основных пигментов; для этой цели изготовляются три различных фотографии с раскрашенного предмета, цветное изображение которого нужно получить; фотографии снимаются через ф и л ь т р ы из желатина, причем для каждого снимка фильтр окрашен в один из основных цветов. С помощью этих фотографий изготовляются обычным способом клише.

Цветное изображение получается благодаря тому, что клише эти оттискиваются одно на другом, причем для оттисков берется краска, цвет которой является дополнительным к цвету фильтра, служившего для приготовления негатива.

470. Цвета тонких пленок. Изучение дополнительных цветов дало нам ключ к объяснению явления, подмеченного в § 461 и заключающегося в том, что верхний край каждой цветной полосы, создаваемой пузырем, окрашен в красноватый цвет, а нижний край — в синеватый.

Дело в том, что у верхнего края более короткие синие волны исчезают благодаря интерференции, а дополнительные красные — остаются; однако у нижнего края каждого кольца, где пленка толще, интерференцией уничтожаются более длинные красные волны, и остается дополнительный синий цвет. Лучи определенной длины волны падающего света создают свои собственные кольца; благодаря наложению различных колец друг на друга и получаются те цветные кольца, которые мы видим в описанном выше опыте. В случае слишком толстой пленки отдельные цвета так перекрывают друг друга, что глаз не в состоянии заметить следов окраски отраженного света.

Если пленка обладает равномерной толщиной, то окраска ее распределена также равномерно, а не по краям, до тех пор пока не меняется угол зрения, под которым наблюдатель рассматривает пленку. При малейшем изменении угла происходит изменение толщины плен-

ки, сквозь которую должен пройти свет на своем пути к глазу наблюдателя, следствием чего является изменение окраски. Этим объясняется великолепная игра радужных цветов в мыльных пузырях, в тонких масляных пленках, в перламутре и т. д.

471. Хроматическая аберрация. До сих пор мы предполагали, что все волны, падающие из какого-либо источника на чечевицу, собираются последней в одну геометрическую точку. Однако, так как синие лучи, проходя сквозь призму, отклоняются на бо́льшую величину, чем красные, то ясно, что, пройдя сквозь чечевицу, синие лучи будут собраны в некоторой точке v (рис. 452), лежащей ближе к чечевице, чем r, куда попадут красные лучи, а все промежуточные цвета окажутся между ними. Поэтому изображение, полученное с помощью простой чечевицы, всегда состоит из цветных колец.

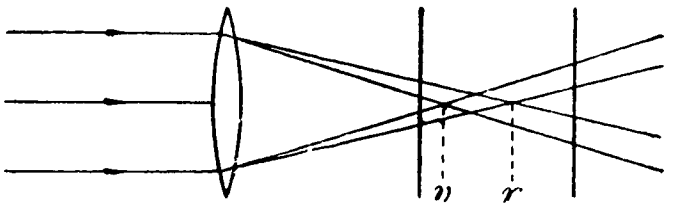


Рис. 452. Хроматическая аберрация чечевицы.

Поместим кусок картона в фокусе чечевицы, поставленной на пути пучка солнечных лучей (рис. 452). Если картон находится ближе к чечевице, чем к фокусу, то светлое пятно на картоне будет окружено красным кольцом, потому что красные лучи меньше всего преломляются, и поэтому оказываются у наружного края. Если же передвинуть картон за фокус, то красное кольцо заменится синим; действительно, за фокусом у наружного края оказываются те лучи, которые испытывают наибольшее отклонение.

Рассеяние света, производимое чечевицей, носит название хроматической аберрации.

472. Ахроматические чечевицы. Хроматическая аберрация, создаваемая простой чечевицей, является весьма серьезным недостатком последней. Однако, к счастью, оказывается возможным почти полностью устранить это явление, соединив в одно целое выпуклую чечевицу из кронгласса и вогнутую чечевицу из флинтгласса (рис. 453). Первая чечевица вызывает как преломление, так и рассеяние, в то время как вторая чечевица почти полностью устраняет рассеяние и вместе с тем не уничтожает преломления лучей. Такие чечевицы носят название ахроматических. Первая такая чечевица была сделана в Лондоне Джоном Доллондом в 1758 г. Ахроматические чечевицы применяются во всех хороших телескопах и микроскопах.

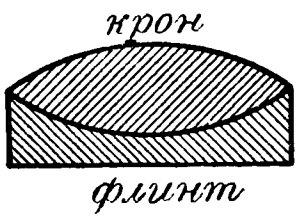


Рис. 453 Ахроматическая чечевица.

Резюме. **Высота тона звуков и цвет световых лучей зависят от длины волн.**

Рассеяние обусловлено неодинаковым преломлением световых лучей различной длины волны, происходящим при косвенном прохождении лучей сквозь какую-нибудь среду.

Цвет тела, освещаемого белым светом, определяется той длиной волны, которую оно не в состоянии поглотить.

Тело, освещаемое цветными лучами, имеет на вид неестественную окраску, потому что оно не получает всех тех цветов, которые оно способно отразить.

Вопросы и задачи.

1. Какая разница в физическом отношении между красным и синим светом?
2. Нарисуйте, как спектр образуется призмой, и укажите относительное положение красного, желтого, зеленого и синего цветов в этом спектре.

3. Синий свет распространяется в стекле быстрее или медленнее красного света? Как это узнать?

4. Чем определяется цвет непрозрачного тела? Прозрачного тела?

5. Что называется «белым»? Что называется «черным»?

6. Объясните, почему глыба льда прозрачна, в то время как снег непрозрачен и белого цвета?

7. Как выглядит в красном свете пучок красной травы? Объясните.

8. Какого цвета будет казаться красное тело, которое находится в комнате, освещаемой одним только зеленым цветом? Почему?

9. Почему любое тело при рассматривании его сквозь красное тело кажется красным или черным?

10. Почему белые тела кажутся синими, если глядеть на них сквозь синее стекло?

11. Какого цвета будет казаться желтый предмет при рассматривании сквозь синее стекло? Предположите, что желтый цвет простой.

12. Газовое пламя обладает более выраженной окраской по сравнению с солнечным светом. Какие длины волн в спектре газового пламени должны обладать относительно меньшей интенсивностью?

13. Почему темно-синий цвет кажется черным при освещении свечой?

14. Некоторые оттенки синего и зеленого цветов невозможно отличить друг от друга при освещении свечой. Объясните, почему.

СПЕКТРЫ.

473. Радуга. В природе образуется иногда замечательный, всем хорошо известный спектр — р а д у г а.

Наполните водой сферическую колбу F (рис. 454) 4 — 5 *см* в диаметре и поместите ее на пути пучка солнечных лучей, который входит в комнату через отверстие в куске картона AB. На экране вокруг отверстия образуется миниатюрная радуга, у которой фиолетовый конец находится ближе к центру круга, а красный — у наружного края. Пучок света, попадающий в точке C в колбу, преломляется и рассеивается, в точке D он испытывает полное внутреннее отражение; далее в точке E, выходя наружу, он снова преломляется и рассеивается. Так как в обоих случаях фиолетовые лучи, преломляясь, отклонялись на больший угол, чем красные, очевидно, что они должны оказаться на обратном пути ближе к падающему пучку, чем красные лучи. Если бы колба представляла собой идеальную сферу, то угол между падающим лучом OC и выходящим из колбы красным лучом ER составлял бы 42°, а угол между падающим лучом и выходящим из колбы фиолетовым лучом EN был бы равен 40°.

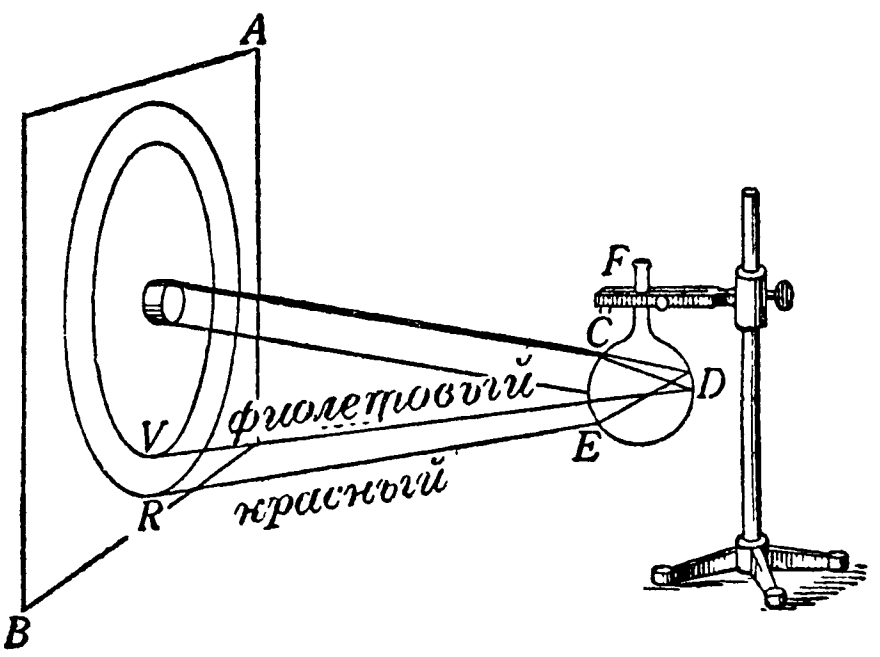


Рис. 454. Искусственная радуга.

Настоящая радуга, которую мы видим на небе, происходит вследствие преломления и отражения света от водяных капелек в воздухе, которые производят точно такое же действие, какое производила в предыдущем опыте колба. Если наблюдатель находится в точке E и обращен к солнцу спиной, то световые лучи, отразившиеся и преломленные водяными каплями и образующие угол в 42° (рис. 455) с прямой, проведенной от наблюдателя к солнцу, будут красного цвета; фиолетовые лучи образуют угол в 42° с этой прямой. Если смотреть на капельки росы, освещенные прямо падающими солнечными лучами,

то цвет их изменится при повороте головы. Далее ясно, что все капли, обладающие тем свойством, что прямая, соединяющая их с глазом наблюдателя, составляет некоторый определенный угол с прямой, проведенной от глаза к солнцу, должны лежать на окружности, центр которой находится на последней прямой. Благодаря этому мы видим цветную дугу, окрашенную у внутреннего края в фиолетовый цвет, а у наружного — в красный. Часто можно видеть вторую радугу, концентрическую с первой, причем теперь красный цвет — у внутреннего края, а фиолетовый — у наружного. Эта радуга создается лучами, испытавшими два полных внутренних отражения, как показано на рис. 455.

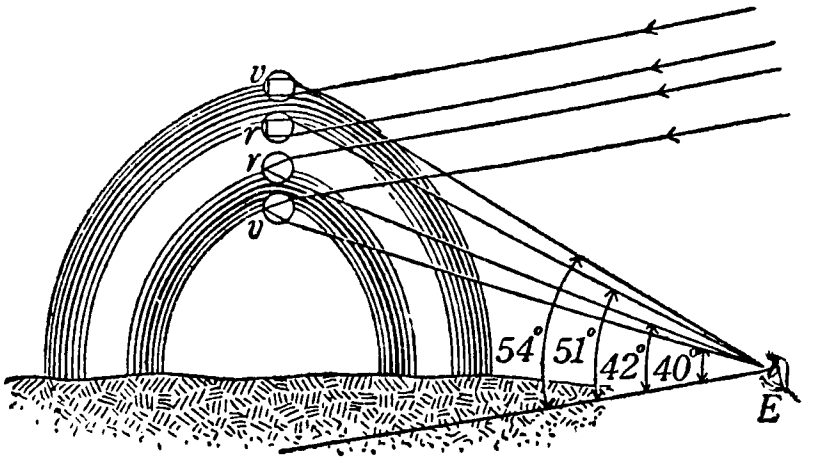


Рис. 455. Первичная и вторичная радуга.

474. Непрерывные спектры. Поместим пред щелью S бунзеновскую горелку, отрегулированную таким образом, чтобы она давала белое пламя (рис. 456). Будем затем смотреть на щель сквозь призму P. Полученный спектр представляет собой непрерывную цветную полосу. Если держать в пламени прямо перед щелью чистую платиновую проволоку, то раскаленная платина также даст непрерывный спектр.

Опыт показывает, что все раскаленные тела и жидкости дают подобного рода спектр, содержащий все длины волн от крайних красных вплоть до крайних фиолетовых. Непрерывный спектр светящегося газового пламени создается находящимися в пламени раскаленными твердыми частицами углерода. Присутствие этих твердых частиц подтверждается хотя бы тем фактом, что тела покрываются копотью, если их держать над таким пламенем.

475. Линейчатые спектры. Погрузим кусочек асбеста или платиновой проволоки в раствор обыкновенной поваренной соли (хлористого натрия) и внесем его в пламя; при этом будем держать проволоку так низко, чтобы ее спектр не мог быть виден. Вместо непрерывного спектра, описанного в предыдущем параграфе, мы увидим ясное желтое изображение щели, занимающее место, принадлежащее желтой части спектра. Это показывает что свет от натриевого пламени представляет собой не смесь световых лучей различных длин волн, а является светом одной определенной длины волны, соответствующей указанному оттенку желтого цвета. Свет этот происходит от светящегося пара натрия, а не от раскаленного твердого тела, как в предыдущем опыте.

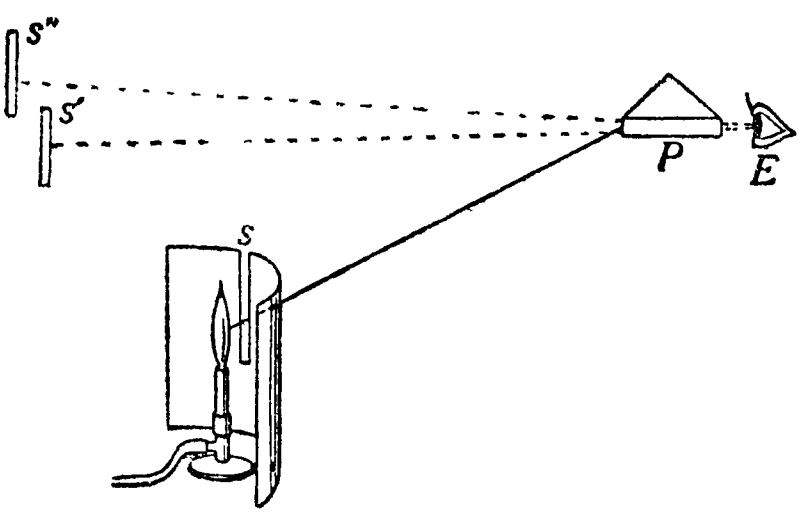


Рис. 456. Установка для изучения спектров.

Погрузим другую платиновую проволоку в раствор хлористого лития и также внесем ее в пламя. Мы увидим два отчетливых изображения щели S' и S'' (рис. 456), одно — в красной, а другое — в желтой части спектра. Внесем затем в пламя хлористый кальций. Мы увидим одно отчетливое изображение щели в зеленой части спектра и другое—в красной и т. д. (Во всех этих случаях, по всей вероятности, будет видно и изображение щели в желтой части спектра, как в случае натрия, потому что натрий встречается в виде примеси почти во всех солях.)

Описанные выше изображения щели, различным образом окрашенные, получили название характеристических спектральных линий изучаемых веществ. Опыты показывают, что раскаленные пары и газы дают линейчатые спектры в отличие от раскаленных твердых тел и жидкостей, дающих непрерывные спектры. Метод исследования состава сложных веществ путем изучения линий в спектрах их паров носит название спектрального анализа. Впервые он был применен в 1859 г. Бунзеном.

476. Солнечный спектр. Пусть пучок солнечных лучей проходит сначала через узкую щель S (рис. 457) не более чем 0,2 *мм* ширины, затем сквозь призму P и, наконец, падает на экран S', как показано на рис. 457. Будем передвигать призму до тех пор, пока пучок белого света, отразившийся от одной из поверхностей призмы, не попадет на ту часть экрана, которая первоначально была занята центральной частью спектра. Затем поместим между призмой и щелью чечевицу L и будем передвигать ее взад и вперед до тех пор, пока на экране не получится резкое белое изображение щели. Делается это для того, чтобы щель S и экран S' совпали с сопряженными фокусами чечевицы. Вернем теперь призму в ее первоначальное положение. Спектр на экране будет состоять из нескольких рядом расположенных цветных изображений щели. Такой спектр называется чистым в отличие от спектра, изображенного на рис. 449 и полученного без помощи чечевицы, которая собирает вместе лучи определенного цвета; поэтому в последнем спектре различные цвета налагаются друг на друга. Если щель и экран действительно находятся в сопряженных фокусах чечевицы, а щель достаточно узка, то в спектре окажется ряд вертикальных черных линий.

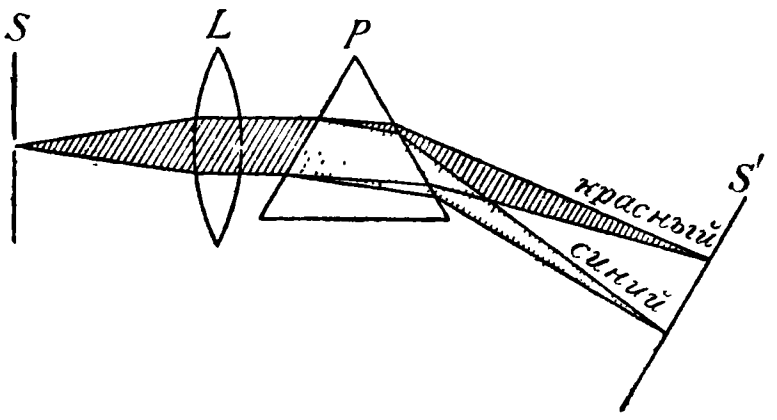


Рис. 457. Установка для получения чистого спектра.

Линии эти были открыты английским ученым Волластоном в 1802 г. и тщательно изучены в 1814 г. немецким физиком Фраунгофером, который нашел до семисот таких линий, в честь его названных фраунгоферовыми линиями. Присутствие их в солнечном спектре показывает, что в солнечном свете отсутствуют лучи некоторых определенных длин волн или, во всяком случае, они значительно слабее соседних. Если опыт производится так, как описывалось выше, то невозможно отыскать более пяти или шести линий. Объяснение их происхождения было дано Кирхгоффом.

477. Объяснение происхождения фраунгоферовых линий. Получим на экране солнечный спектр способом, описанным в § 476. Затем положим несколько кусочков металлического натрия на смоченный спиртом кусок асбеста. Поместим этот кусок асбеста между щелью и чечевицей или слева от щели и подожжем спирт. Сразу же появится в желтой части спектра черная полоса на том самом месте, где лежит спектральная линия самого натрия; если же и раньше в отсутствие натрия можно было видеть в желтой части спектра темную линию, то теперь она сделалась гораздо чернее. Таким образом, ясно, что существование этой темной линии в желтой части солнечного спектра определенным образом связано с тем, что солнечный луч где-то прошел сквозь пары натрия.

Опыт этот сразу же объясняет появление фраунгоферовых линий. Белый свет, испускаемый раскаленным солнечным ядром и содержащий лучи всех без исключения длин волн, должен был пройти сквозь пары и газы, окружающие солнце и землю, следствием чего явилось

ослабление лучей некоторых, определенных длин волн, вызванное поглощением. Дело в том, что любой газ или пар поглощает те самые длины волны, которые он сам способен испускать в раскаленном состоянии. Обусловлено то теми же самыми причинами, которые заставляют, например, камертон отвечать (резонировать) только на колебания (т. е. поглощать их) того же самого периода, как и создаваемые им колебания. Поэтому тот факт, что темная линия в желтой части солнечного спектра находится как раз на том же самом месте, как и широкая желтая линия, которую дают раскаленные пары натрия, приводит нас к заключению, что в солнечной атмосфере должны содержаться пары натрия. Сравнивая таким же образом положения спектральных линий различных элементов с положениями различных темных линий в солнечном спектре, удалось убедиться в том, что многие химические элементы, имеющиеся на Земле, находятся также и на Солнце. Так, например, Кирхгофф показал, что четыреста шестьдесят известных ему ярких линий железа совпадают с соответствующими темными линиями солнечного спектра. Рис. 458 изображает фотографию солнечного спектра (посередине) и соответствующую часть спектра железа (с обеих сторон). (Приведенная здесь фотография относится только к синей части спектра.) Легко видеть, что каждая яркая линия железа совпадает в точности с темной линией солнечного спектра.

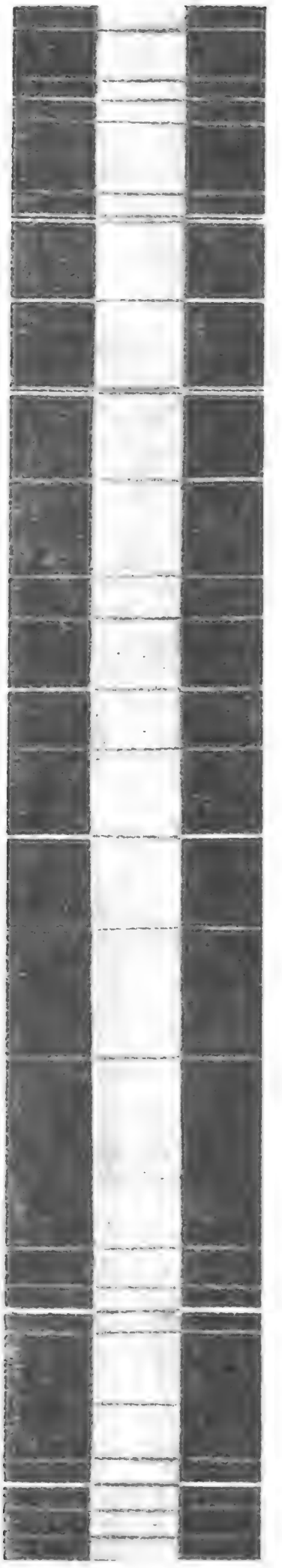


Рис. 458. Сравнение солнечного спектра и спектра железа.

478. Явление Допплера в применении к световым волнам. Напомним (см. явление Допплера, § 388, стр. 285). что в случае движения звучащего тела по направлению к наблюдателю длина волны испускаемого звука немного уменьшается, а при движении от наблюдателя (в противоположную сторону) длина волны возрастает. Точно так же, когда звезда движется по направлению к Земле, все длины волн испускаемого ею света будут немного меньше, чем длина волны соответствующего света от земного источника. Поэтому в спектре такой звезды все линии будут немного смещены в сторону фиолетового конца спектра. Если же звезда движется от Земли, то все линии окажутся смещенными в сторону красного конца спектра.

Зная направление и величину смещения, мы можем вычислить скорость, с которой звезда приближается к солнечной системе или удаляется от нее.

Подобного рода наблюдения показали, что некоторые звезды движутся в мировом пространстве по направлению к солнечной системе со скоростью около 260 *км* в секунду; однако при такой скорости и даже если бы движение происходило по прямой, соединяющей звезду с Землей, должно было бы пройти не менее 70 000 лет для того, чтобы земля пришла в соприкосновение с ближайшей к нам звездой.

Резюме. **Непрерывные спектры создаются светом, испускаемым раскаленными твердыми телами и жидкостями.**

Линейчатые спектры создаются раскаленными парами или газами.

Спектры поглощения создаются светом от раскаленных твердых тел или жидкостей, проходящих сквозь раскаленный пар или газ.

Вопросы и задачи. [1]

1. В какой части неба должна появиться радуга, если она образуется ранним утром?
2. Почему радугу никогда не видно посредине дня?
3. Объясните причину образования непрерывного спектра в том случае, когда свет от электрической лампы накаливания проходит сквозь призму.
4. Чем отличается непрерывный спектр от спектра, полученного в том случае, когда источником света является бунзеновская горелка, в которой производится испарение натрия?
5. Почему мы предполагаем, что на солнце имеется натрий?
6. Какой спектр должен давать лунный свет? (На луне нет атмосферы.)
7. Если бы вам была дана смесь каких-то солей, то каким образом вы бы могли с помощью бунзеновской горелки, призмы и щели узнать, имеется ли в этой смеси кальций или нет?
8. Нарисуйте, как должны быть расположены щель, призма и чечевица для образования чистого спектра.

ГЛАВА XX[1].

НЕВИДИМЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ.

ИЗЛУЧЕНИЕ ОТ НАГРЕТОГО ТЕЛА.

479. Невидимые части спектра. При фотографировании спектра оказывается, что действие на фотографическую пластинку может быть обнаружено далеко за пределами самых коротких видимых фиолетовых лучей. Эти так называемые ультрафиолетовые лучи были сфотографированы вплоть до длины волны в 0,00000136 *см*, представляющей только одну тридцатую длины волны самых коротких фиолетовых лучей.

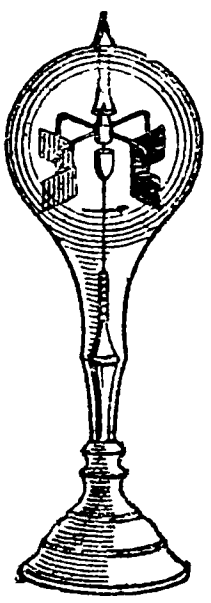


Рис. 459. Радиометр Крукса.

Самые длинные видимые лучи в крайней красной части спектра обладают длиной волны около 0,00008 *см*, однако чувствительные термоскопы позволяют обнаружить существование так называемой инфракрасной части спектра, исследование которой было произведено в 1912 г. Рубенсом и фон Бейером (Берлин) вплоть до длин волн в 0,03 *см*, т. е. в 400 раз превосходящих длину самых крайних видимых лучей (рис. 459).

Существование этих крайних так наз. инфракрасных лучей, обладающих большой длиной волны, может быть обнаружено с помощью особого прибора — радиометра (рис. 459), изобретенного Круксом и усовершенствованного Е. Ф. Никольсом. В своем обычном виде он состоит из частично откачанного баллона, внутри которого помещается небольшая алюминиевая вертушка с укрепленными на ней четырьмя крылышками, зачерненными с одной стороны и отполированными с другой. Когда прибор находится под сол-

[1] Дополнительные вопросы и задачи к главе XX помещены в приложении.

нечными лучами или перед лампой, крылышки вращаются, причем зачерненные поверхности всегда движутся по направлению от источника излучения, потому что они поглощают световые волны лучше отполированных поверхностей и поэтому больше нагреваются. Нагретый воздух, соприкасающийся с этими поверхностями, оказывает на них большее давление, чем воздух, находящийся в соприкосновении с отполированными поверхностями.

Поместим радиометр как раз за красным концом спектра. Он покажет присутствие невидимых инфракрасных лучей, обладающих даже большей энергией, чем лучи видимого спектра. Далее, поместим в сопряженных фокусах большого зеркала раскаленный докрасна шарик и радиометр или какой-либо другой прибор, чувствительный к инфракрасным лучам (рис. 460). При этом окажется, что невидимые инфракрасные лучи отражаются и фокусируются так же, как и обыкновенные световые лучи. Затем возьмем плоскую бутыль, наполненную водой, и поместим ее между радиометром и источником тепла. Опыт этот показывает, что вода, которая прозрачна по отношению к световым лучам, поглощает почти все инфракрасные лучи. Однако, если заменить воду сероуглеродом, то инфракрасные лучи будут беспрепятственно распространяться даже в том случае, когда жидкость будет сделана непрозрачной для световых лучей растворением в ней иода.

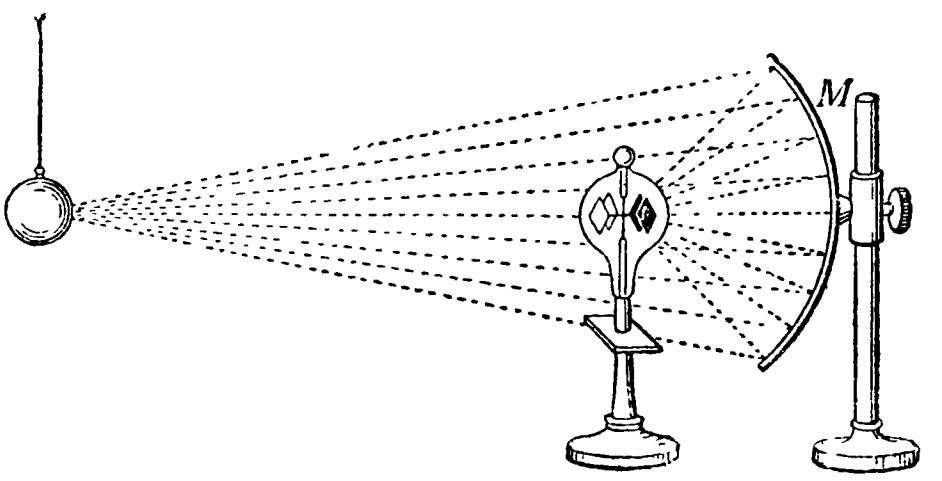


Рис. 460. Отражение инфракрасных лучей.

480. Излучение и температура. Все тела даже при обыкновенных температурах непрерывно излучают энергию в виде волн. Подтверждением этого служит тот факт, что температура тела, находящегося в наилучшем вакууме, какой только может быть достигнут, продолжает непрерывно падать, если окружающая среда находится при более низкой температуре, например, если все погружено в жидкий воздух.

Волны, испускаемые при обыкновенных температурах, обладают несомненно весьма большой длиной волны по сравнению со световыми волнами. По мере повышения температуры, испускается все большее и большее количество этих длинных волн, однако одновременно с этим непрерывно растет и испускание более коротких волн. Около 525° С начинают появляться первые видимые волны, соответствующие лучам темнокрасного цвета. Начиная с этой температуры, благодаря появлению все более и более коротких волн, цвет непрерывно меняется, превращаясь сначала в оранжевый, затем — в желтый и, наконец, между 800°С и 1200°С — в белый. Другими словами, все тела «накаляются докрасна» при температуре около 525°С и «добела» — при температуре от 800°С до 1200°С.

Некоторое представление о том, как быстро возрастает общее излучение с повышением температуры, может дать хотя бы то обстоятельство, что нагретая платиновая проволока дает при 1400°С в тридцать шесть раз больше света, чем при 1000°С, хотя уже и при этой температуре она раскаляется докрасна. Излучение от нагретого тела разделяется иногда на создаваемое тепловыми (инфракрасными) лучами, световыми лучами и химическими, или актиническими, лучами. Однако такое подразделение ведет к заблуждению, так как все получаемые волны являются тепловыми лучами в том отношении, что,

поглощаясь материей, они вызывают нагревание, т. е. увеличение интенсивности молекулярных движений.

481. Излучение и поглощение. Хотя все вещества начинают испускать волны определенной длины приблизительно при одной и той же температуре, однако общее количество энергии, излучаемой в секунду при данной температуре, зависит в высокой степени от природы излучающей поверхности. Вообще, опыт показывает, что поверхности, хорошо поглощающие излучение, являются также хорошими излучателями. Отсюда следует, что хорошо отражающие поверхности, например, отполированные металлы, должны скверно излучать.

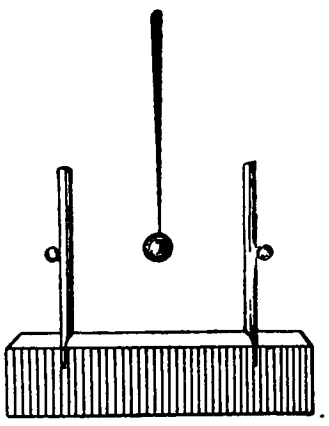


Рис. 461. Тела поверхности, хорошо отражающие, плохо поглощают.

Так, например, возьмем два листочка из жести поверхностью в 5 или 10 *кв. см*; один из них отполируем, а другой закоптим с одной стороны и затем поместим их вертикально на расстоянии 10 *см* друг от друга закопченной стороной одного — против отполированной поверхности другого. К наружной поверхности каждого приклеим воском небольшой шарик. Затем поместим по середине между листочками нагретую металлическую пластинку или шарик (рис. 461). Воск на листочке жести с закопченной поверхностью расплавится скорее и шарик упадет раньше; это показывает, что копоть поглощает тепловые лучи быстрее, чем отполированная жесть. Произведем теперь другой опыт. Соединим два зачерненных стеклянных шарика U-образной трубкой, содержащей подкрашенную воду (см. рис. 462). Затем возьмем хорошо отполированную жестяную банку, зачерним одну ее половину и, наполнив кипятком, поместим между шариками. Движение воды в U-образной трубке покажет, что зачерне ная половина банки излучает тепло значительно быстрее второй половины, хотя обе они находятся при одной и той же температуре.

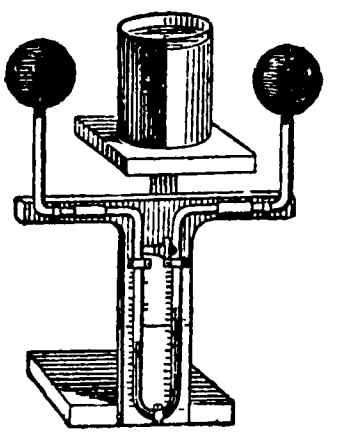


Рис. 462. Тела, хорошо отражающие, хорошо излучают.

На листе белой бумаги сделаем тушью, графитом или копотью черный кружок и затем определим время, потребное для того, чтобы с помощью линзы зажечь бумагу, концентрируя солнечные лучи на черном пятне. Проделаем тот же самый опыт и узнаем время, которое в тех же самых условиях необходимо для зажигания незачерненной части бумаги.

Резюме. **Световые видимые волны обнимают менее чем одну октаву частот, т. е. чрезвычайно малую часть всего излучения.**

С повышением температуры появляются все более и более короткие волны, и кроме того увеличивается интенсивность всего излучения (всех длин волн).

Хорошо поглощающие тела хорошо излучают и хорошо излучающие тела хорошо поглощают.

Вопросы и задачи.

1. Как обнаруживаются ультрафиолетовые волны? Какой прибор служит для обнаружения инфракрасных волн?
2. Какое тело испускает в большем количестве красные лучи: железо, раскаленное добела, или то же самое железо, раскаленное докрасна?
3. Объясните, каким образом солнечное тепло нагревает землю.
4. Солнечный свет, попадающий в глаз наблюдателя, проходит при восходе и закате более длинный путем, чем в полдень. Так как Солнце представляется в это время красным или желтым, какие лучи больше всего поглощаются атмосферой?
5. Если сидеть перед открытой печкой, то каким путем больше всего передается теплота: теплопроводностью, конвекцией или лучеиспусканием?

6. Стекло пропускает все видимые волны и задерживает длинные инфракрасные волны. На основании этого факта объясните устройство парников.

7. В какой шляпе прохладнее в жаркий день: в белой или в черной?

8. В каком металлическом сосуде чай будет быстрее остывать: в полированном или с тусклой поверхностью?

9. Какой радиатор парового отопления, по вашему мнению, выгоднее: блестящий никкелированный или темный неотполированный? Объясните.

10. Земная атмосфера прозрачна для большинства солнечных лучей. Почему в верхних слоях атмосфера значительно холоднее, чем в нижних?

11. Сосуды для жидкого воздуха и термосы представляют собой стеклянные сосуды с двойными стенками; воздух из пространства между стенками выкачан. Жидкий воздух сохраняется во много раз дольше в том случае, когда стеклянные стенки посеребрены. Почему? Почему в пространстве между стенками создается вакуум?

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ.

482. Колебательный характер разряда лейденской банки. Мы нашли в § 408, что звуковые волны, посылаемые звучащим камертоном, приводят в колебание соседний камертон, если последний обладает тем же самым периодом свободных колебаний, как и первый.

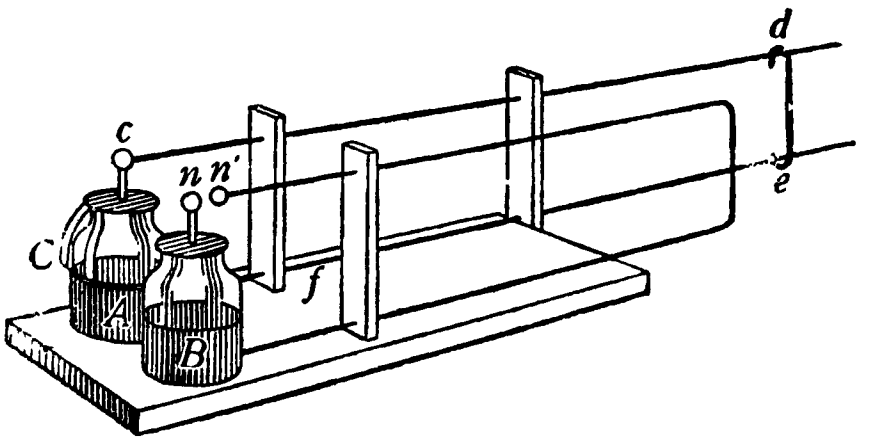


Рис. 463. Резонанс электрических колебаний.

Соединим внутреннюю и внешнюю обкладки лейденской банки A (см. рис. 463) проволочной петлей $cdef$; скользящая перекладина de позволяет изменять по произволу длину этой петли. Кроме того, укрепим на банке полоску станиоля, как показано на рис. 463. Затем соединим обкладки точно такой же второй банки B с шариками n и n' второй такой же проволочной петлей. Поставим обе банки рядом так, чтобы петли их расположились параллельно, и затем будем последовательно заряжать и разряжать банку B, соединив ее обкладки со статической машиной или индукционной катушкой. При каждом разряде B через шарики n и n' в другой банке будет появляться искра в месте C в том случае, когда перекладина de помещена таким образом, чтобы площади обеих петель были равны. Если передвигать de, уменьшая или увеличивая размеры одной петли сравнительно с размерами другой, то искра в C исчезнет.

Таким образом, опыт этот показывает, что два электрических контура подобно двум камертонам могут быть настроены как бы в унисон, и подобно тому как камертоны перестают отвечать на звучание друг друга, если немного изменить период одного из них, так и электрический резонанс исчезает, когда нарушается строгая симметрия обоих контуров. Так как, очевидно, это явление резонанса может иметь место только между системами с каким-то периодом собственных колебаний, то опыт показывает, что разряд лейденской банки представляет собой колебательное явление. В самом деле, если рассматривать такую искру в быстро вращающемся зеркале, то действительно оказывается, что она состоит из 10 — 30 вспышек, следующих одна за другой через равные промежутки времени.

На рис. 464 представлена фотография такой искры.

Несмотря на наличие этих колебаний, весь разряд происходит в течение невероятно короткого промежутка времени около $1{,}10^{-6}$ секунды.

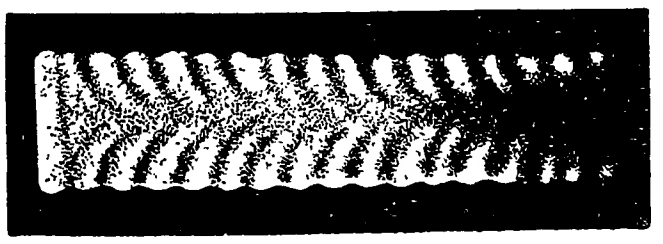
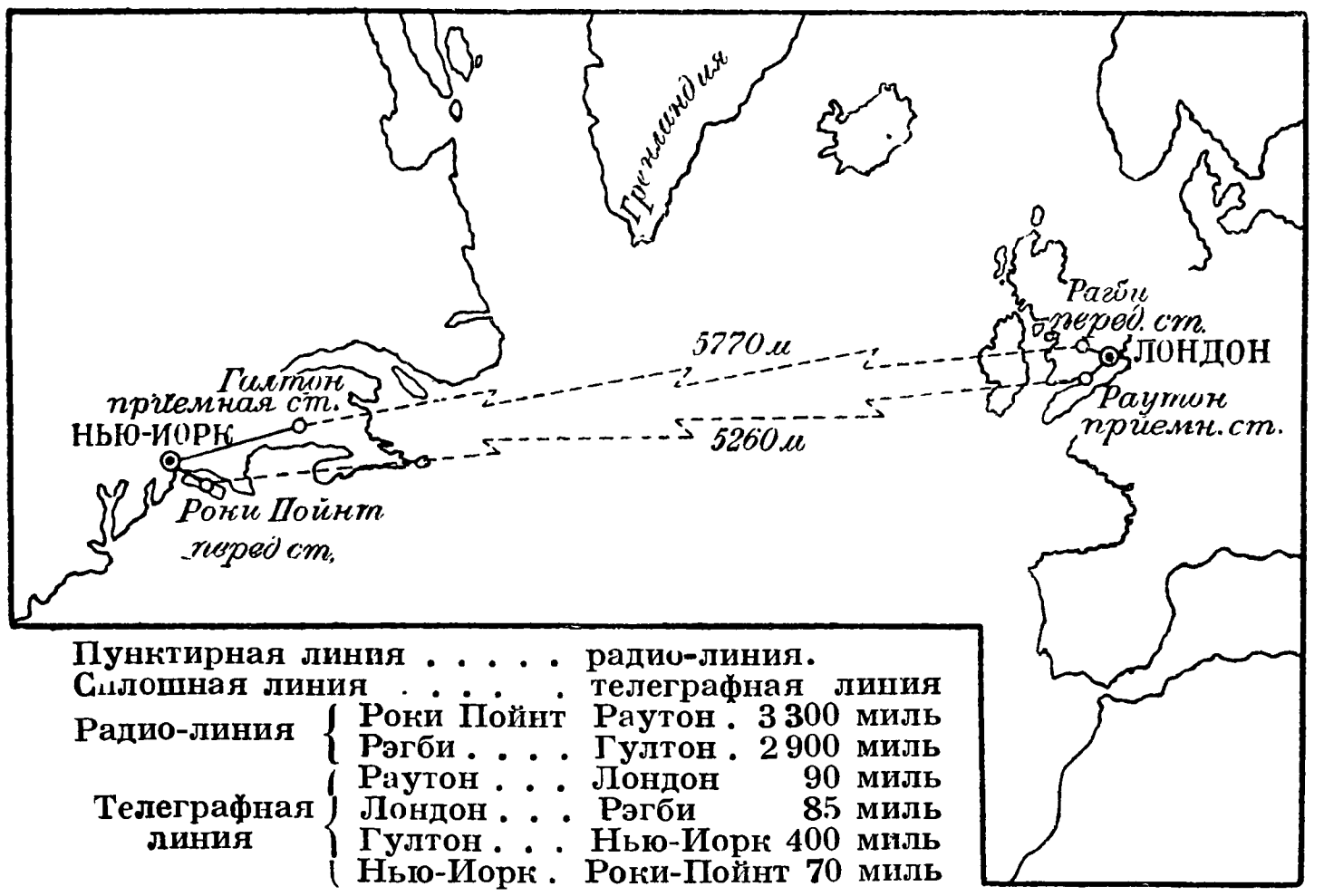


Рис. 464. Колебания электрической искры.

Это обстоятельство вместе с сильным светом, даваемым искрой, позволило достигнуть изумительных результатов в области так называемой м о м е н т а л ь н о й ф о т о г р а ф и и (см. стр. 209 и 335). На рис. стр. 335 представлена фотография, изображающая, как пуля проходит сквозь мыльный пузырь.



Пунктирная линия . . . . . радио-линия.
Сплошная линия . . . . . телеграфная линия

Радио-линия	Роки Пойнт	Раутон .	3 300 миль
	Рэгби	Гултон .	2 900 миль
Телеграфная линия	Раутон . . .	Лондон	90 миль
	Лондон . . .	Рэгби	85 миль
	Гултон . . .	Нью-Иорк	400 миль
	Нью-Иорк .	Роки-Пойнт	70 миль

КАРТА ИСПЫТАНИЙ ТРАНСАТЛАНТИЧЕСКИХ РАДИО-ТЕЛЕФОННЫХ ЛИНИЙ.

С 1915 г. было произведено много испытаний, чтобы поставить трансатлантические радио-переговоры на прочную основу. Наконец, 7 марта 1926 г., с помощью 100 киловатт удалось в течение четырех дней поддерживать связь между Нью-Йорком и Лондоном, причем легко можно было распознать голоса. 7 января 1927 г. была налажена регулярная связь. Когда над всем Атлантическим океаном день или ночь — трудности не так уж велики. Но иногда (напр.. во время заката) для поддержания связи надо было бы иметь в тысячи раз большую мощность. Полный успех будет достигнут, когда Нью-Йорк сможет в л ю б о е время дня с абсолютной уверенностью вызвать и связаться с Лондоном и Парижем. В настоящее время это не всегда возможно, но трудности, повидимому, преодолимы. При трансатлантическом радио-телефонировании принято пользоваться двойной модуляцией в передатчике. Модулированная волна проходит через высоко-мощный усилитель. На американском конце прием производится в обратном порядке: принимаемый сигнал демодулируется, усиливается, опять демодулируется и еще раз усиливается. На английском конце происходит аналогичный процесс, только с одной демодуляцией.

483. Электрические волны. Опыт § 482 показывает не только колебательный характер разряда лейденской банки, но и то, что эти электрические колебания создают в окружающей среде возмущения или особого рода волны, которые, распространяясь, попадают в соседний контур и действуют на него точно так же, как воздушные волны действовали на второй камертон в опытах со звуком. Являются ли эти волны воздушными волнами подобно звуковым, или возмущениями подобными световым волнам, легко определить, измерив их скорость распространения. Первое определение этой скорости было произведено Генрихом Герцем в 1888 г. Он нашел, что она в точности равняется скорости света, т. е. составляет 300 000 *км/сек*. Этот результат показывает, что электрические колебания создают волны, аналогичные световым, так называемые волны Гертца.

Длина волн, испускаемых колебательным разрядом, применяемым для моментальной фотографии, очевидно, весьма велика, а именно около $\frac{300\,000\,000}{10\,000\,000}$, или 30 *м*, так как скорость света равна 300 000 *км/сек*, а число колебаний в секунду равно 10 000 000; мы уже знаем § 383, что длина волны представляет собою частное от деления скорости распространения на число колебаний в секунду. Умеьшая размеры банки и длину контура, можно значительно уменьшить и длину волны. Однако и в этом случае длина таких волн в миллионы раз превышает длины волн видимого света. Производя электрические разряды не между обкладками конденсатора, а между двумя шариками диаметром меньше миллиметра, удалось получить электрические волны длиною в 0,3 *мм*, т. е. такой же длины, как и самые длинные инфракрасные лучи.

484. Обнаружение электрических волн. В опыте § 482 мы обнаруживали присутствие электрических волн с помощью небольшого искрового промежутка C, помещенного в контуре, почти совершенно тождественном с тем, в котором создавались колебания. Такую искру можно применять для обнаружения волн только на расстоянии нескольких метров от источника, но для обнаружения слабых волн, приходящих от источника, удаленного на сотни и тысячи километров, приходится прибегать к помощи звуков, создаваемых в чрезвычайно чувствительных телефонных приемниках; об этом будет рассказано в следующем параграфе.

485. Беспроволочный телеграф. Беспроволочный телеграф, как средство связи, был осуществлен в 1896 г. Маркони, восемь лет спустя после открытия волн Герца. Основными составными частями так называемой «искровой» системы беспроволочного телеграфа являются следующие.

Ключ K на отправительной станции (рис. 465, 1) служит для замыкания цепи, состоящей из альтернатора (генератора переменного тока) A и первичной обмотки P трансформатора T; частота переменного тока составляет обычно около 500 периодов в секунду. Индукционный ток высокого напряжения, возбуждаемый во вторичной обмотке S, заряжает конденсатор C_1 до такого потенциала, при котором происходит искровой разряд через промежуток S. Этот разряд конденсатора C_1 имеет колебательный характер (§ 482), причем в коротковолновой отправительной установке небольшой мощности частота

колебаний, возникающих в контуре, содержащем C_1 S и L, может достигать 1 000 000 в секунду. Обычно применяются колебания значительно более низкой частоты, причем последняя изменяется радио-оператором так же, как и в случае, изображенном на рис. 463, с помощью скользящего контакта c. Колебания в контуре, содержащем конденсатор, индуцируют колебания в

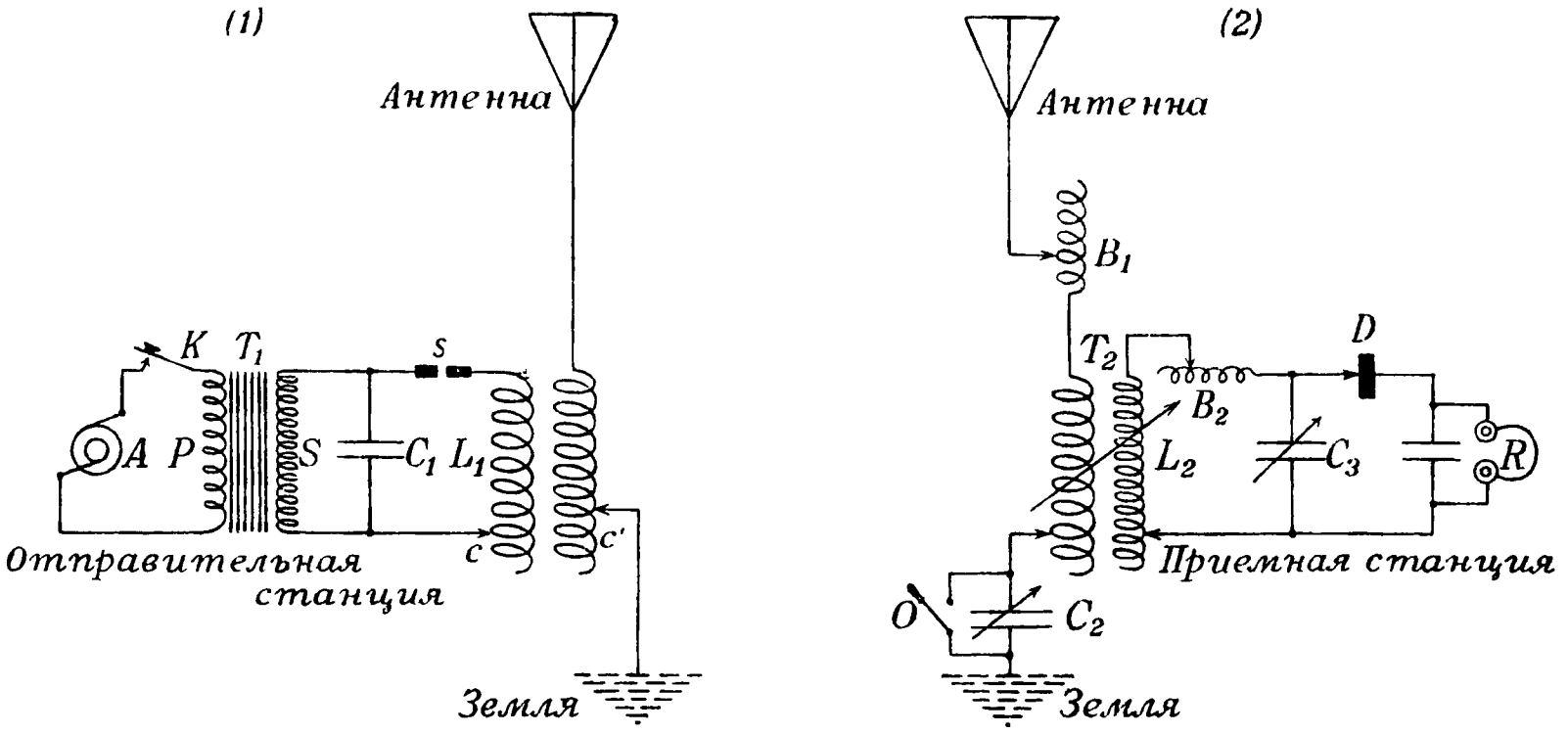


Рис. 465. Отправительная и приемная радиостанция.

контуре антенны, настроенном в резонанс с первыми контуром с помощью скользящего контакта C_1.

До тех пор пока ключ K замкнут (при том условии, что употребляется альтернатор на 500 периодов), через искровой промежуток проскакивают 1 000 искр в секунду и, следовательно, из антенны в секунду излучается 1 000 «волновых пакетов» и распространяется дальше со скоростью света. Если колебания, создающие такой «волновой пакет», имеют частоту, равную, например, 500 000 в секунду, то каждая волна в «волновом пакете» имеет длину в $\frac{300\,000\,000}{500\,000}$, или 600 *м*; если в одну секунду излучается 1 000 таких «волновых пакетов», то они следуют друг за другом на равных расстояниях в 300 *км*.

Рис. 466. Последовательность волн, создаваемых колебательным разрядом.

Волны, посылаемые антенной отправительной станции, возбуждают такие же колебания в находящейся на далеком расстоянии антенне приемной станции (рис. 465, 2), которая настроена в резонанс с отправительной антенной.

При приеме очень длинных волн рубильник O замыкается и выключает конденсатор C_2, и при этом пользуются самоиндукцией или дроссельной катушкой L_1; с другой стороны, для настройки на прием коротких волн рубильник O размыкается, в цепь вводится конденсатор C_2 переменной емкости, а дроссельной катушкой теперь не пользуются. [1]

Колебания в антенне приемной станции возбуждают точно такие же колебания в детекторном контуре, который настроен в резонанс с приемной антенной с помощью L_2 B_2 и C_3. Так называемый детектор в простейшем своем виде представляет собой галеновый кристалл D, соединенный последовательно с телефонным приемником R. Этот кристалл, подобно ионному

[1] Стрелка на чертеже, пересекающая конденсатор, показывает, что с целью настройки емкость конденсатора можно изменять по желанию в некоторых пределах. Подобным же образом, стрелка, пересекающая два индуктивно связанных контура, как, например, первичную и вторичную обмотки трансформатора высокой частоты T, показывает, что можно изменять степень связи обоих контуров, например, сближая катушки или удаляя их друг от друга.

выпрямителю в § 375, обладает свойством пропускать электрический ток только в одном направлении. [1] Если бы не это его свойство, то телефон не мог бы употребляться в качестве детектора, потому что его диафрагма не может совершать колебаний, частота которых порядка миллиона; даже в том случае, если бы это было возможно, она создавала бы звуки, недоступные для слуха. Благодаря выпрямляющему свойству кристалла диафрагма приемника притягивается к полюсам магнита только до тех пор, пока проходит данный «волновый пакет», причем действие это вызывается выпрямленным пульсирующим током; последний проходит через телефон в одном направлении и затем исчезает, снова появляясь в тот момент, когда возбуждаются колебания от следующей искры. Так как в течение одной секунды в антенну попадает сто «волновых пакетов», то оператор на приемной станции слышит непрерывную музыкальную ноту все время, пока ключ K замкнут. При работе ключом, так же как и на обыкновенном телеграфе, правильная последовательность «волновых пакетов» разбивается на отдельные группы, благодаря чему в телефоне (рис. 467) слышны короткие и длинные ноты, соответствующие точкам и черточкам телеграфной азбуки. Приемный контур, настроенный, как показано на рис. 465 (2), обладает высокой селективностью, т. е. он не принимает волн другого периода. Дроссельные катушки B_1 и B_2, так же как и два конденсатора переменной емкости C_2 и C_3, обычно отсутствуют в небольших любительских приемниках; но в этом случае приемник обладает меньшей селективностью и меньшей чувствительностью. Сопротивление телефонов столь высоко (обычно от 1 000 и 4 000 омов), что они не оказывают никакого влияния на колебания контура, в который они включены. Приемная станция, изображенная на рис. 465 (2), пригодна также и для приема сообщений беспроволочного телефона.

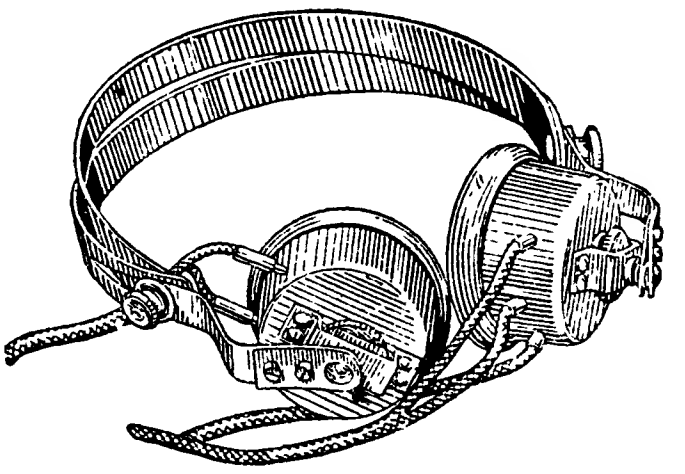


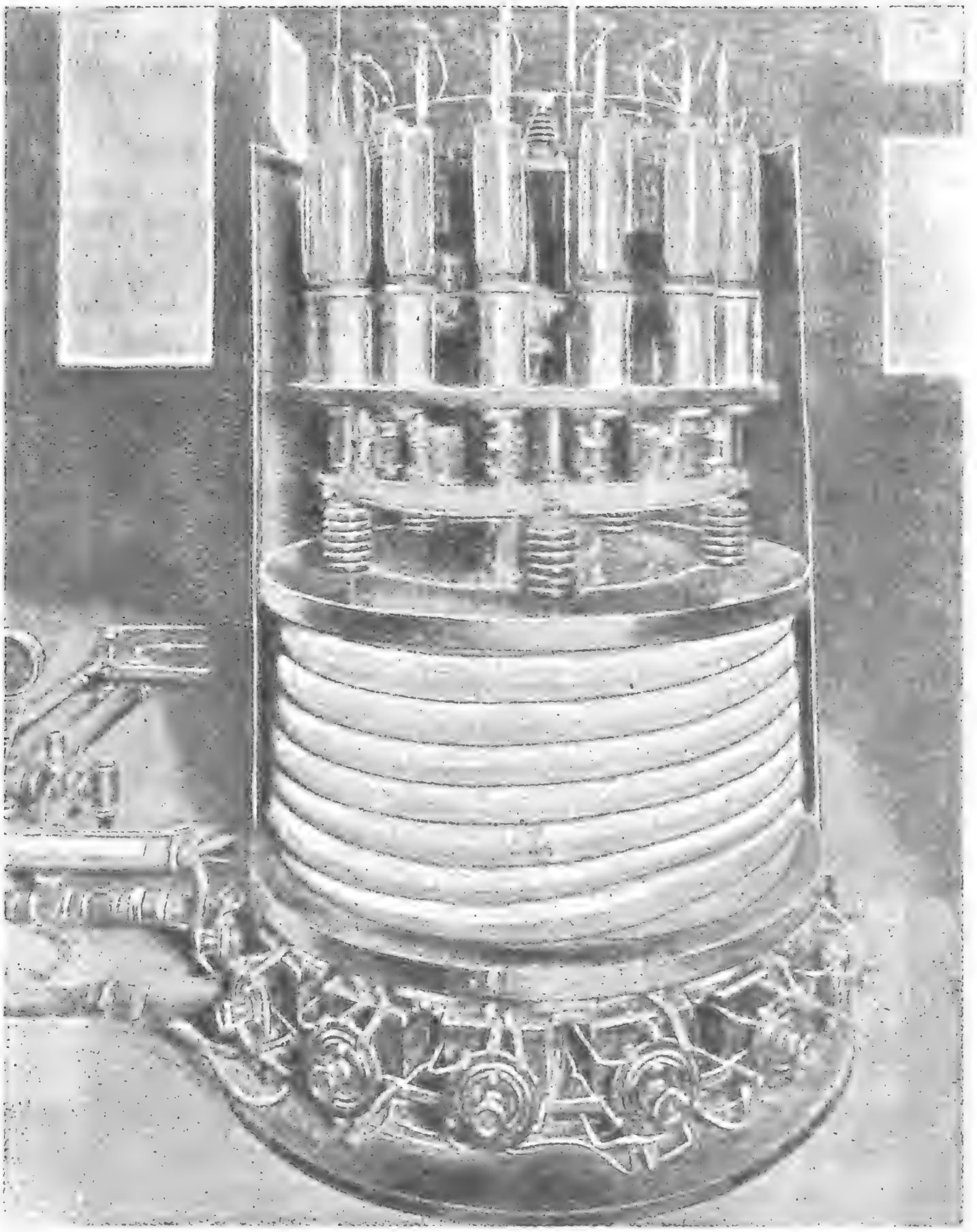
Рис. 467. Наушники для радиоприемника.

Хотя искровая система беспроволочного телеграфа получила в свое время исключительно широкое распространение, однако в настоящее время она полностью вытеснена системами, в которых применяются «незатухающие колебания». Дело в том, что сигналы, создаваемые «незатухающими колебаниями», допускают более «острую» настройку, т. е. значительно меньше интерферируют с сигналами станций, применяющих несколько отличную длину волны. Подобно тому как звуковые волны, отличающиеся немного частотой друг от друга, сочетаясь, производят явление биений (§ 396), так и электрические колебания различной частоты, соединяясь, производят «биения». Так, например, если электрические колебания частоты 30 000 и 31 000 в секунду налагаются друг на друга, то биения происходят с частотой 1 000 колебаний в секунду, вполне доступной для слуха. Электрические колебания, о которых говорилось выше, обладают частотой, лежащей далеко за пределами акустических частот и поэтому получившей название радиочастоты или «высокой частоты»; что же касается биений, то они лежат в интервале акустических или так называемых «низких» частот. Предположим теперь, что на отправительной станции имеется генератор переменного тока, посылающий в антенну мощные незатухающие колебания с частотой, равной 30 000 в секунду;

---

[1] Кристаллические детекторы широко вытесняются ламповыми детекторами как в беспроволочной телеграфии, так и в беспроволочной телефонии.

предположим далее, что на приемной станции имеется генератор колебаний, поддерживающий в местной приемной антенне сравнительно слабые колебания с частотой, равной 31 000 в секунду. Эти слабые

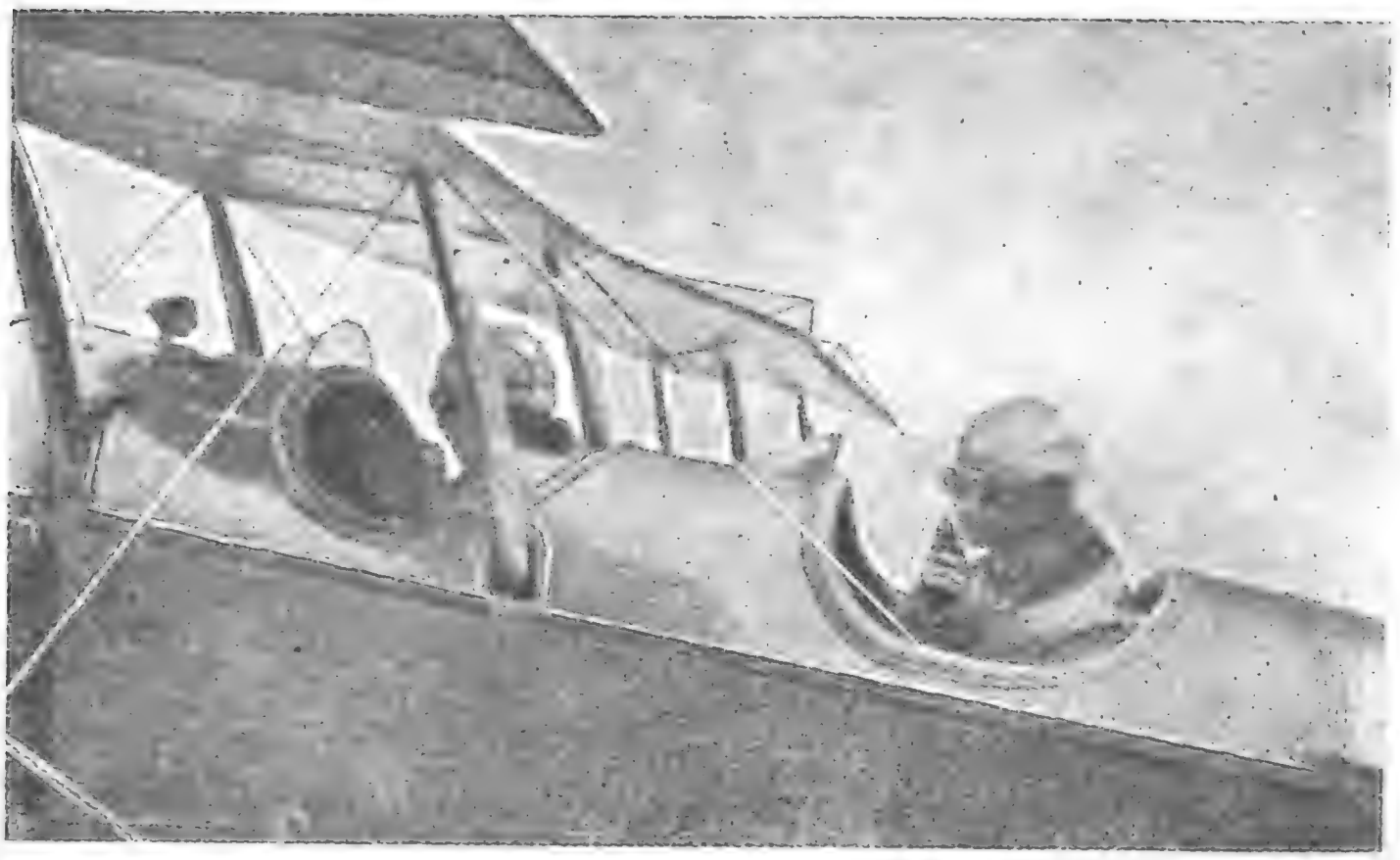


МОЩНЫЕ УСИЛИТЕЛЬНЫЕ ТРУБКИ С ВОДЯНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ.

На рисунке показано 15 10-киловаттных вакуумных трубок, соединенных параллельно. Этот набор трубок употреблялся в передатчике Нью-Иоркской станции во время трансатлантических радио-телефонных испытаний в марте 1926 г. По резиновым трубкам вода обтекает усилительные трубки; в то же время они достаточно длинны, чтобы изолировать пластины, потенциал которых 10 000 вольт. Сопротивление столба воды сильно превышает 100 000 ом.

колебания, создаваемые в приемной антенне местным генератором, не произведут звука в приемнике, потому что они являются колебаниями высокой частоты; однако, как только оператор на отправитель-

ной станции нажмет ключ, в приемную антенну начнут приходить волны, соответствующие колебаниям с частотой, равной 30 000 в секунду, и возбуждать там слабые колебания, которые, налагаясь на



УПОТРЕБЛЕНИЕ БЕСПРОВОЛОЧНОГО ТЕЛЕФОНА В АВИАЦИИ.

Одним из самых замечательных применений радио во время войны было управление эскадрильей аэропланов по беспроволочному телефону с земли или с аэроплана командира. На верхнем рисунке виден пилот, разговаривающий с наблюдателем при помощи специального апарата служащего для уничтожения влияния шума от аэроплана. На нижнем рисунке изображен президент Вильсон, говорящий с аэропланом по беспроволочному телефону.

местные колебания, создадут биения частоты, равной 1 000 колебаний в секунду.

Далее эти биения выпрямляются кристаллом или электронной лам-

пой и проходят через телефон. Слушатель воспринимает долгие и короткие музыкальные звуки, так же как и прием сигналов искровой станции. Система приема, основанная на применении биений, называется г е т е р о д и н н о й системой.

486. Модулированные незатухающие колебания.[1] Колебания, образующие членораздельную речь, обладают чрезвычайно сложным

Рис. 468. Ряд волн.

характером, как показывает таблица на стр. 299. Благодаря этой сложности оказывается невозможным передавать человеческую речь с помощью затухающих волн (рис. 468), получаемых в искровой системе беспроволочного телеграфа, описанной в предыдущем параграфе. Отдельные части речи пропадают из-за промежутков между отдельными «волновыми пакетами», вследствие чего речь перестает

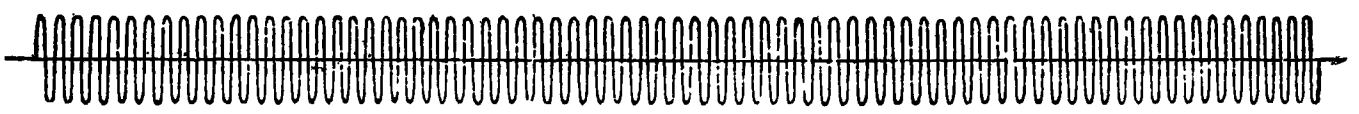


Рис. 469. Непрерывные, или несущие, радиоволны.

быть понятной. Для передачи разговоров применяются незатухающие колебания высокой частоты, образующие так называемую «несущую» волну (рис. 469).

На отправительной станции незатухающие колебания (рис. 469) «модулируются» в передатчике человеческим голосом, т. е. звуковые

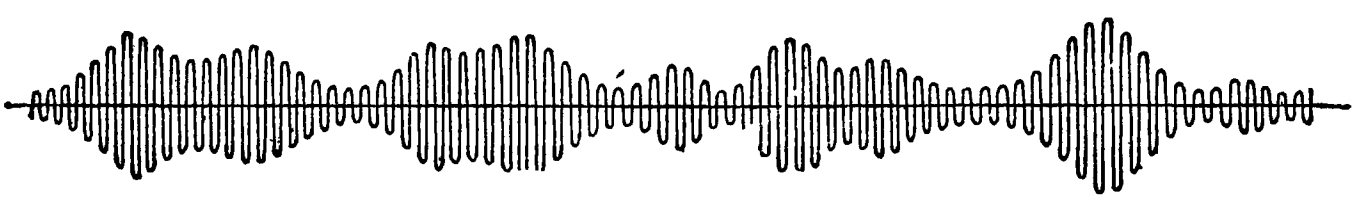


Рис. 470. Модулированные радиоволны.

волны, создаваемые голосом, действуют на прибор таким образом, что при этом происходит изменение амплитуды незатухающих колебаний (рис. 470). Эти модулированные незатухающие радиоволны, достигнув антенны приемной станции, создают в ней электрический ток, сила которого колеблется в соответствии с колебаниями в отпра-

Рис. 471. Выпрямленные колебания.

вительном контуре. С помощью кристалла или электронной лампы ток этот выпрямляется и превращается в ряд постоянных по направлению импульсов, в роде изображенных на рис. 471. Эти импульсы,

[1] Прежде чем приступить к чтению следующих шести параграфов, учащийся должен усвоить §§ 375; 376, 377; 482, 483, 484.

частота которых лежит в области радиочастот, достигнув телефонного приемника слушателя, производят колебания диафрагмы низкой частоты, которая редко выходит за пределы 1000—3000 колебаний в секунду.

Эти колебания низкой частоты изображены на рис. 472. Колебания диафрагмы приемника соответствуют колебаниям, производимым

Рис. 472. Изменения звуковой частоты.

человеческим голосом оратора на отдаленной отправительной станции.

487. Получение незатухающих колебаний. Одним из наиболее важных средств получения незатухающих волн большой мощности является альтернатор высокой частоты Александерсона. Он представляет собой динамомашину переменного тока, строящуюся на самые различные мощности вплоть до 200 киловатт (= 268 HP); ротор в некоторых машинах вращается с огромной скоростью, совершая до 20 000 оборотов в минуту. Для целей трансатлантического радиотелеграфирования такие машины питают отправительную антенну током высокой частоты силою от 600 до 1 200 ампер. Непрерывно поддерживаемые колебания электронов в антенне и производят незатухающие электромагнитные волны (рис. 469).

Кроме того для генерирования незатухающих волн применяются дуга Паульсона и главным образом электронные лампы большой мощности.

488. Электронная лампа. Среди целого ряда приспособлений, позволяющих модулировать человеческим голосом «несущую волну», наиболее важными являются вакуумные приборы, так называемые «электронные лампы» (рис. 473). *F* представляет собой центрально расположенную нить, *C* — окружающую нить сетку и анод (на рис. передняя половина срезана), окружающий сетку (см. стр. 366 и 374).

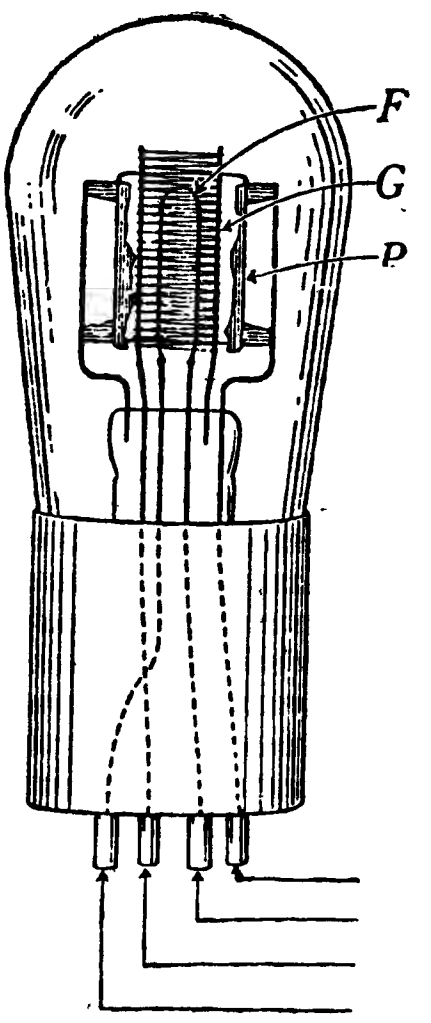


Рис. 473. Распространенная форма пустотной лампы, применяемой для радиоприема.

Для выяснения принципов, на которых основывается действие электронной лампы, напомним, что электрический ток представляет собой поток отрицательных электронов, которые, проходя через вакуум, движутся с огромными скоростями, достигающими нескольких тысяч километров в секунду (§ 494); вместе с тем, проходя по проволоке (обыкновенная проводимость), они движутся весьма медленно (со скоростью нескольких сантиметров в секунду). При изучении ионного выпрямителя (§ 375) мы нашли, что отрицательные электроны

испускаются при определенных условиях раскаленной нитью. Когда положительный полюс батареи B (рис. 474) присоединен к аноду P электронной лампы, а отрицательный полюс — к нити F, то, до тех пор пока нить остается холодной, ток через вакуум не проходит. Когда же нить накаляется батареей A, то из нее вырываются отрицательные электроны и целым потоком устремляются к положительно заряженному аноду P. Поток отрицательных электронов от нити к аноду представляет собой не что иное, как электрический ток; только направление последнего обычно принято считать в обратном направлении, т. е. от анода к нити. Мы видим теперь, что батарея A, поддерживая накал нити, создает одно из условий, необходимых для того, чтобы батарея B могла поддерживать устойчивый ток, проходящий через вакуум. Электронный поток от холодного анода к нити невозможен, потому что холодные тела за редкими исключениями (см. § 495), не испускают сами электронов. Таким образом, электронная лампа может быть также использована в качестве выпрямителя, хотя, конечно, при замене источника постоянного тока (батарея B) источником переменного тока такой выпрямитель будет пропускать ток одного направления в течение только одной половины каждого периода.

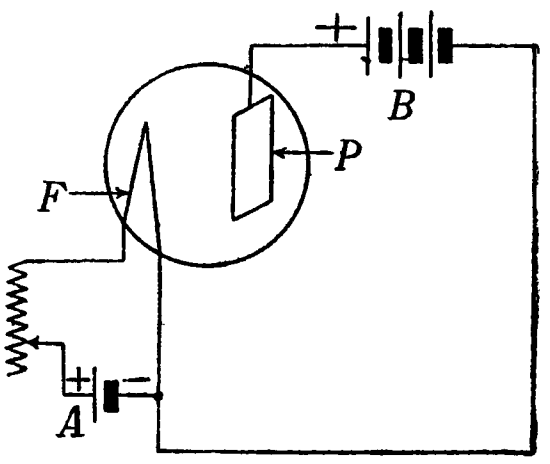


Рис. 474. Двухэлектродная пустотная трубка.

Если между нитью и анодом на рис. 474 поместить экран C из тонкой проволоки или так называемую сетку (см. рис. 475) и с помощью батареи C поддерживать сетку при достаточно высоком потенциале, то электроны не смогут выйти из раскаленной нити, и, следовательно, ток сквозь вакуум исчезнет. Если изменять теперь потенциал сетки, например, от нуля до того его значения, при котором ток прекращается, то сила тока от батареи B, проходящего сквозь пустоту, также будет изменяться от максимального своего значения, которого она достигала при отсутствии сетки, и до нуля. Таким образом, изменение сеточного потенциала дает нам возможность изменять по желанию силу тока, проходящего сквозь пустоту. При этом оказалось, что небольшие изменения в напряжении, приложенном к сетке, производят поразительно большие изменения в силе тока, проходящего сквозь трубку; таким образом, электронная лампа является усилителем.

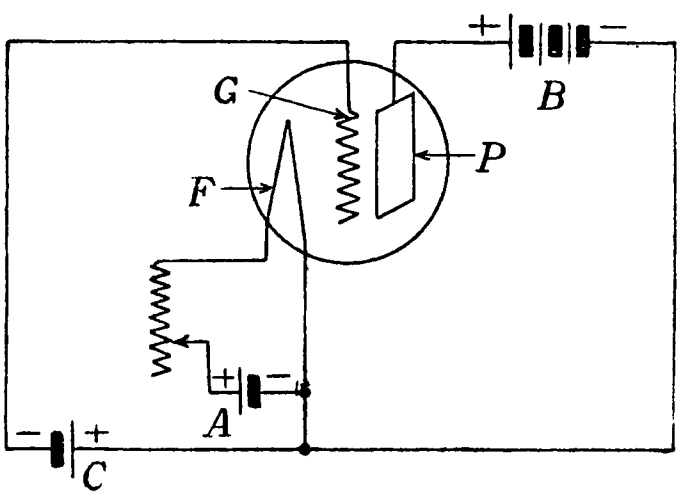


Рис. 475. Трехэлектродная пустотная трубка.

489. Приемная станция. На рис. 476 изображена схема регенеративного приемника, годного для приема длинных или коротких волн. Когда модулированные волны (рис. 470) достигают настроенной антенны приемной станции, они создают в ней слабые электрические колебания, которые возбуждают колебания в катушке L_2 настроен-

ного контура сетки. Это вызывает изменения потенциала сетки C_2, следствием чего являются соответствующие изменения в силе электронного тока, идущего от раскаленной нити к аноду P_2 и отсюда обратно через анодную катушку PC. Контур анода настроен по отношению к контуру сетки таким образом, что эти изменения силы тока в анодной катушке действуют индукционно на самоиндукцию L_2, соединенную с контуром сетки, в результате чего происходит усиление первоначального тока в сеточном контуре. Благодаря этому возрастает приложенное к сетке напряжение, вследствие чего в свою очередь усиливается сила тока, проходящего от нити к аноду, а это еще больше усиливает изменения сеточного потенциала, и т. д., до тех пор пока не будет достигнута максимальная сила электронного тока. Это и составляет сущность принципа регенерации, предложенного Армстронгом, с помощью которого весьма слабые колебания, производимые приходящими волнами, могут быть усилены и затем применены к усилению принимаемых колебаний.

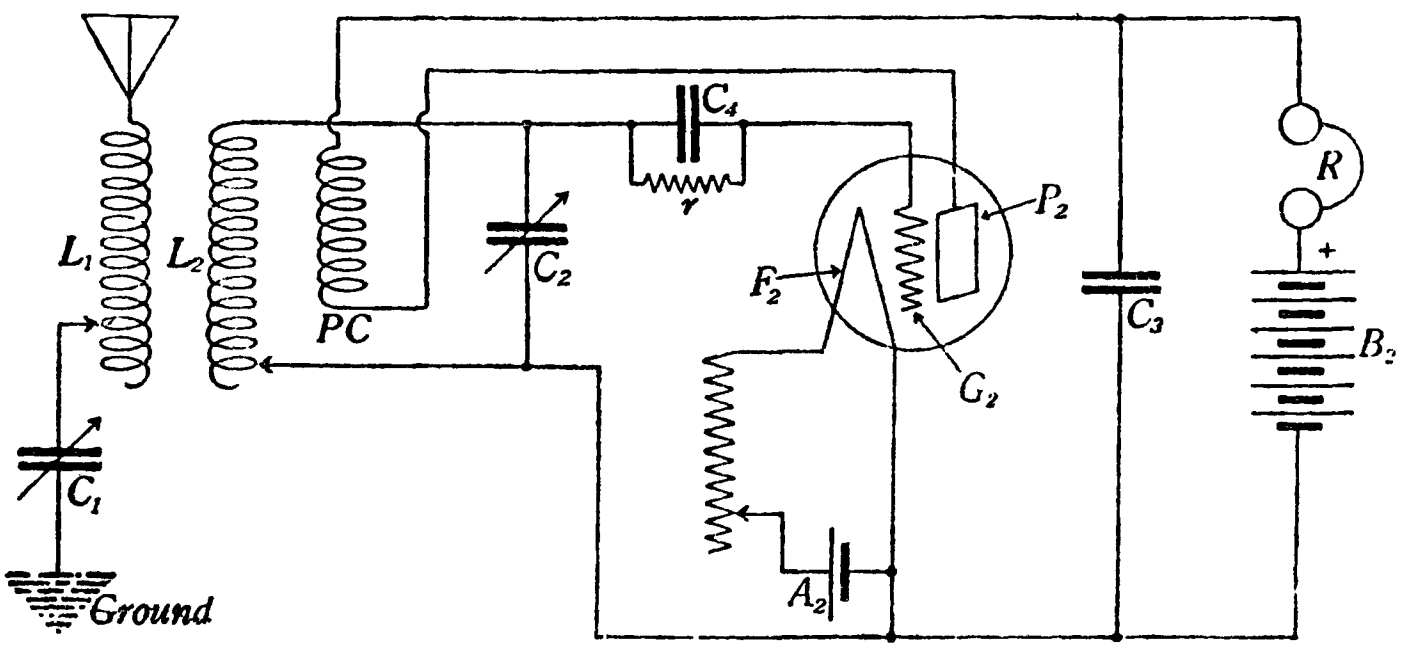


Рис. 476. Регенеративная приемная схема.

Энергия, потребная для регенерации, сообщается батареей B. Когда электронная лампа находится в действии, сетка стремится приобрести отрицательный заряд, который, как мы видели в § 488, в свою очередь стремится совершенно прекратить действие лампы. Поэтому, параллельно с конденсатором C включен гридлик r, обладающий высоким сопротивлением и служащий для того, чтобы возвращать скопляющиеся электроны обратно в нить F_2, через r и L_2. Телефоны, применяемые в радиотехнике, содержат много тысяч витков очень тонкой проволоки, намотанной на железо; вследствие того, что эти катушки обладают весьма высоким сопротивлением для токов высокой частоты, высокочастотная часть анодного тока проходит большей частью через конденсатор C_3, в то время как низкочастотная часть (рис. 472) анодного тока проходит через телефон и действует на диафрагму.

В настоящее время существует такое разнообразие приемных схем, что регенеративные приемники, изображенные на рис. 476, уже выходят из употребления, тем более, что такой приемник легко нач нает генерировать колебания, вследствие чего из приемника он превращается в небольшую отправительную станцию. Хотя волны,

посылаемые антенной, весьма слабы, однако они часто мешают работе других, особенно расположенных по соседству приемников.

На рис. 477 изображена приемная схема, в которой этот недостаток устранен; однако здесь усиление производится тремя лампами вместо одной. Так же как и на рис. 476, колебания, возникающие в части контура между антенной и землей, возбуждают такие же колебания в цепи сетки T_1, настраиваемой с помощью емкости C_5. T_1 не содержит конденсатора (подобного C_4 на рис. 476) и в ее анодной цепи вместо телефона помещается катушка самоиндукции L_5. Эта катушка обладает малым сопротивлением для токов высокой частоты, вследствие чего колебания высокой частоты проходят через нее; сила тока гораздо больше, чем в цепи сетки. Таким образом, T_1 является усилителем высокой частоты. Колебания в L_5 возбуждают такие же колебания в L_6 и в контуре сетки лампы T_2, настраиваемой с помощью C_6. T_2 действует подобно лампе в схеме на рис. 476 с той разницей, что здесь отсутствует регенеративная катушка PC. T_2 называется

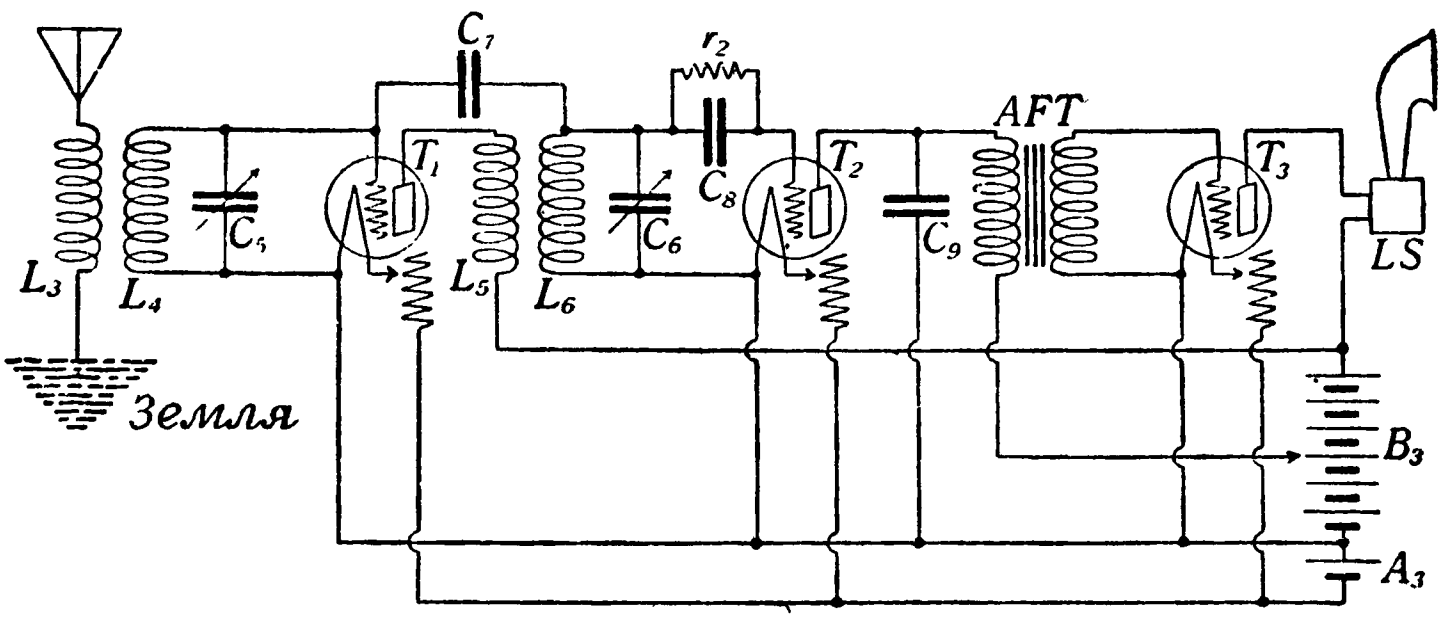


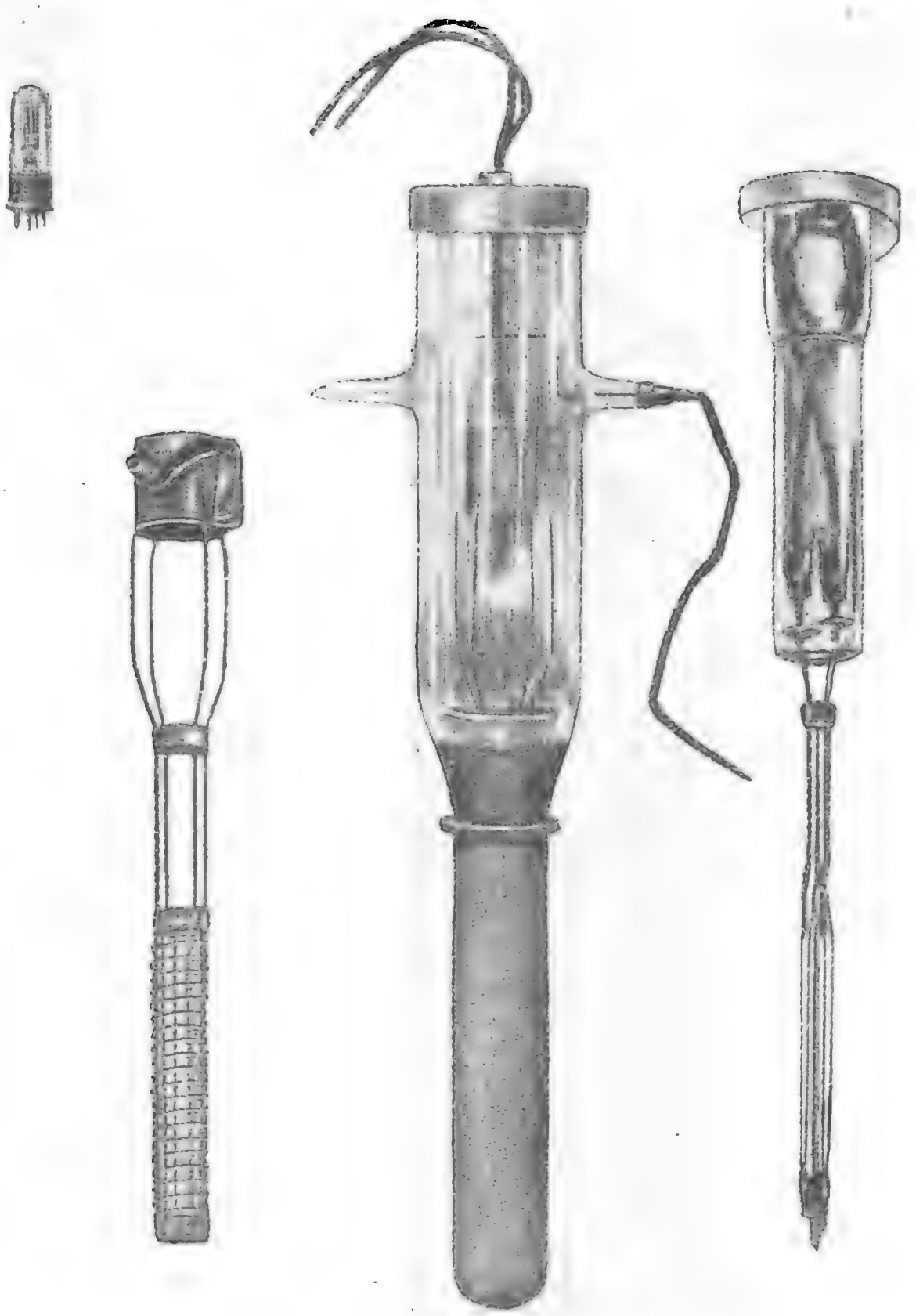
Рис. 477. Приемная схема с усилителями высокой и низкой частоты.

детектором, или выпрямителем, потому что здесь происходит превращение колебаний высокой частоты в низкочастотные колебания (см. § 486). Эти колебания низкой частоты проходят через первичную обмотку трансформатора низкой частоты AT, снабженного железным сердечником, который обозначен на схеме вертикальными прямыми, помещенными между обмотками. Вторичная обмотка трансформатора низкой частоты присоединена к сетке лампы T_3, которая таким образом становится усилителем низкой частоты. Другими словами, колебания низкой частоты, попадающие на сетку лампы T_3, производят такие же, но гораздо более сильные колебания в цепи анода. Усиление может быть достаточно для приведения в действие громкоговорителя LS. Для питания всех ламп служит одна и та же батарея накала A_3 и анодная батарея B_3; однако для питания детекторной лампы служит только часть батареи B_3. Сетка и анод электронн й лампы обладают некоторой емкостью и являются вследствие этого как бы небольшими конденсаторами. Указанное обстоятельство не оказывает никакого влияния на T_2 и T_3, но производит нежелательное действие на T_1; для нейтрализации этого действия служит небольшой конденсатор C_7, благо-

даря которому вся схема получила название «н е й т р о д и н а». Далее, для еще большего улучшения силы приема можно применить несколько усилителей как высокой, так и низкой частоты.

В настоящее время нашли употребление также и многие другие приемные схемы («рефлекс», «супергетеродин», «солодин», «стрободин» и т. д.).

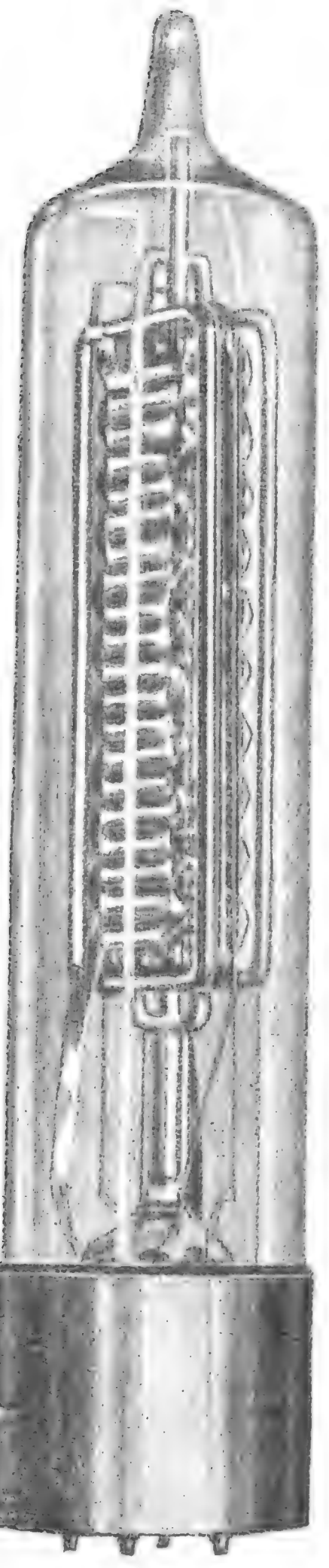
490. Отправительная станция. Электронную лампу можно применять не только в качестве выпрямителя, детектора, модулятора и усилителя, но при определенных условиях также и в качестве г е н е р а т о р а к о л е б а н и й, частота которых может меняться в чрезвычайно широких пределах: от менее чем одного колебания в секунду до 300 000 000 и более колебаний в секунду. В настоящее время почти на всех широковещательных станциях применяются ламповые генераторы. Для передачи на большие расстояния употребляются к а с к а д ы усилительных ламп, позволяющие посылать в антенну многие сотни киловатт.



На рисунке видны сравнительные размеры детекторной трубки с сухим элементом и громадной силовой трубки с водяным охлаждением, способной дать антенне энергию в 20 киловатт. Маленькая лампа работает нормально при 0,25 амп. и 1,1 вольт на нити и при 0,0028 амп. (2,8 миллиамп.) при $22^1/_2$ в. между нитью и анодом. Силовая трубка работает с током накала в 52 ампера при 22 вольтах и анодным током в 2 амп. при 15 000 вольт. Слева и справа от большой трубки — ее нить и сетка.

Кроме того, на многих широковещательных станциях применяются ламповые генераторы мощностью от 1 до 10 киловатт в каждой лампе. Далее, для опытов по трансатлантическому телефонированию были построены ламповые генераторы на 20 киловатт, и разрабатывается конструкция лампового генератора мощностью в 100 киловатт. Продолжительность жизни электронной лампы составляет обычно от 1000 до 5000 часов, в то время как машина высокой частоты А л е к с а н д е р с е н а может прослужить много лет.

В задачу настоящей книги совершенно не входит описание всех деталей радиотелефонной отправительной станции. Однако мы приводим на рис. 478 схему устройства, применяемого для передачи речи на большие расстояния и состоящего из следующих частей: колебания воздуха, производимые голосом, вызывают изменения



ВАКУУМНАЯ ТРУБКА, УПОТРЕБЛЯВШАЯСЯ ПРИ ПЕРВЫХ ОПЫТАХ ПО БЕСПРОВОЛОЧНОЙ ТЕЛЕФОНИИ.

Необычайное развитие электроники нашло себе промышленные приложения. Быть может, из них самые значительные следующие. В июле 1914 г., после развития аудиона де-Фореста в неискажающее телефонное релэ с усилителем и введения этих усилителей в нужные места телефонной линии Сан-Франциско — Нью-Иорк, — физики Западной Электрической Компании могли дать публике возможность в Нью-Иорке и Бостоне слышать совершенно ясно плеск волн в Сан-Франциско. Летом 1915 г. той же группе лиц удалось передать телефонную речь в антенну в Арлингтоне с такой интенсивностью, что она прошла без проводов треть окружности земли и была так ясно слышна на приемных станциях Гонолулу и Парижа, что можно было даже различить голоса говоривших.

Здесь дан разрез (около $^1/_3$ натуральной величины) одной из трубок, с которыми была проделана эта поразительная нижняя демонстрация. С помощью их можно было получить усиления в 10 000 000 000 000 раз.

силы тока в первичной цепи телефонного передатчика (§ 377). Благодаря этому во вторичной цепи появляется электродвижущая сила индукции, которая создает изменения низкой частоты в потенциале сетки электронной лампы, служащей для модуляции. Вызванные этим колебания низкой частоты силы тока в анодной цепи модулятора производят соответствующее действие на колебания высокой частоты, создаваемые генератором. Эти модулированные колебания

высокой частоты усиливаются с помощью каскада мощных усилителей и поступают через трансформатор высокой частоты в антенну. В настоящее время установлена уже регулярная телефонная связь между Европой и Америкой.

491. Электромагнитная теория света. Изучение электрических излучений, произведенное нами в последних параграфах, показало, что они не только распространяются со скоростью света, но что, кроме того, они обладают способностью отражаться, преломляться и поляризоваться; таким образом, они обладают всеми свойствами световых волн, отличаясь от последних только большей длиной волны. На основании этого современная физика рассматривает свет как электромагнитное явление; т.е., другими словами, она считает, что световые волны создаются колебаниями

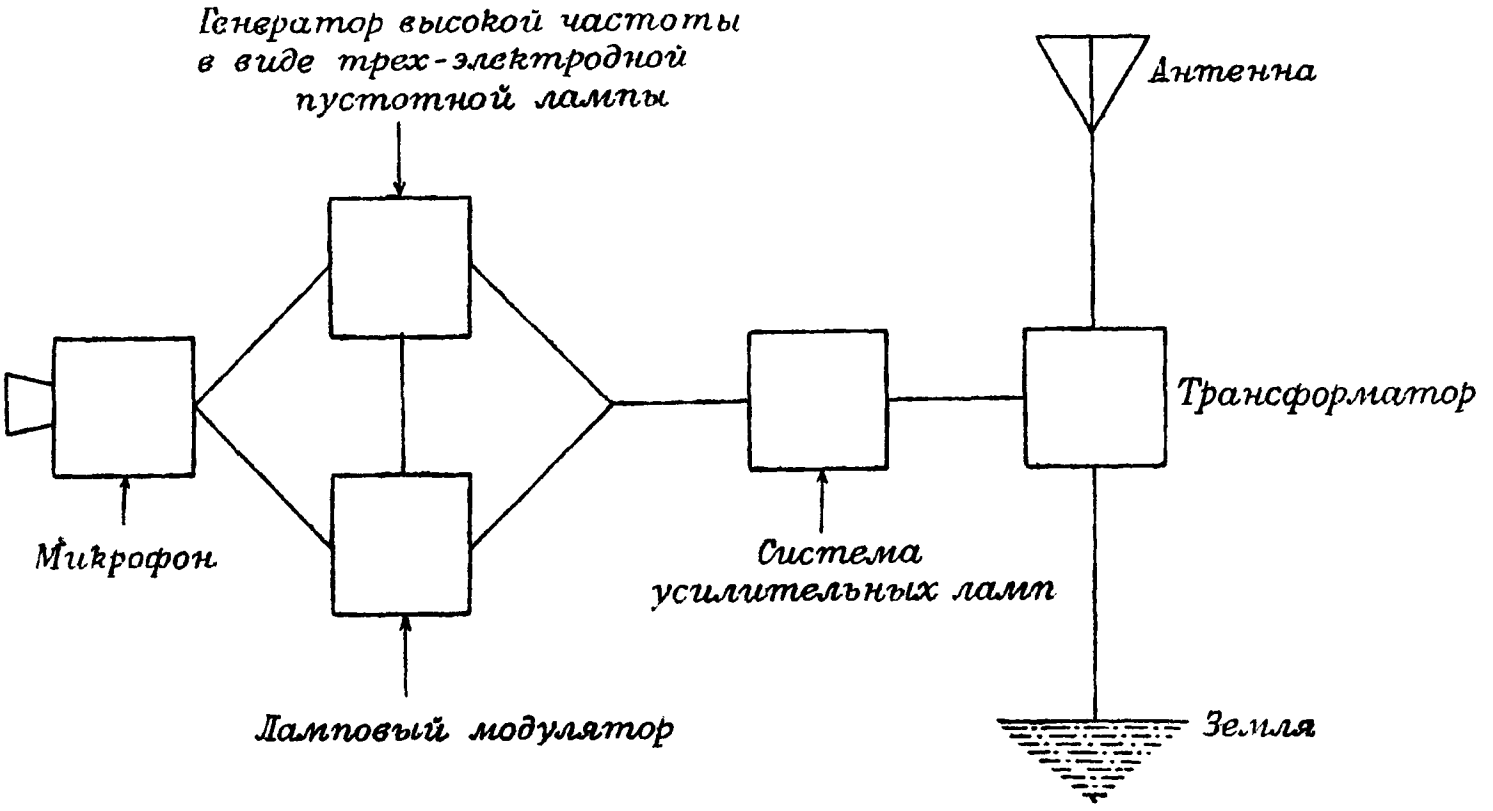


Рис. 478. Радиотелефонная отправительная станция высокой мощности для больших расстояний.

заряженных частей атомов. Еще в 1864 г. один из самых блестящих мировых физиков и математиков Клерк Максвелл (Кембридж, Англия) показал, что волны в эфире могут быть созданы с помощью электрических возмущений. Однако экспериментальное подтверждение его теория нашла только в 1888 г. в известных опытах Герца. Таким образом Максвелл и Герц — оба являются творцами современной электромагнитной теории света.

КАТОДНЫЕ И РЕНТГЕНОВЫ ЛУЧИ.

492. Электрический разряд в разреженных газах. *a* и *b* (рис. 479) — электроды индукционной катушки или статической машины; *e* и *f* — электроды, впаянные в стеклянную трубку 60 или 80 *см* длиною; *g* — резиновая трубка, ведущая к насосу для откачки воздуха из трубки. Приведем индуктор в действие, до того как началась откачка. Искра проскочит между *a* и *b*, потому что *ab* является гораздо более коротким путем, чем *ef*. Затем быстро откачаем трубку. Когда давление упадет до нескольких сантиметров ртутного столба, мы увидим, что разряд предпочтет длинный путь *ef* короткому пути *ab*, показывая таким образом, что произойти разряду в частичном вакууме легче, чем в воздухе при обыкновенном давлении.

Когда разряд начинает проходить между *e* и *f*, то он имеет вид длинной ленты малинового цвета. По мере того как разрежение увеличивается, эта лента расширяется до тех пор пока красное сияние не заполняет всю трубку. Так называемые Г е й с л е р о в ы трубки представляют не что иное, как описанную выше трубку с тем только отличием, что ее обычно изгибают, придавая самую фантастическую форму, и иногда окружают прозрачной оболочкой, содержащей окрашенные жидкости, которые создают красивые световые эффекты.

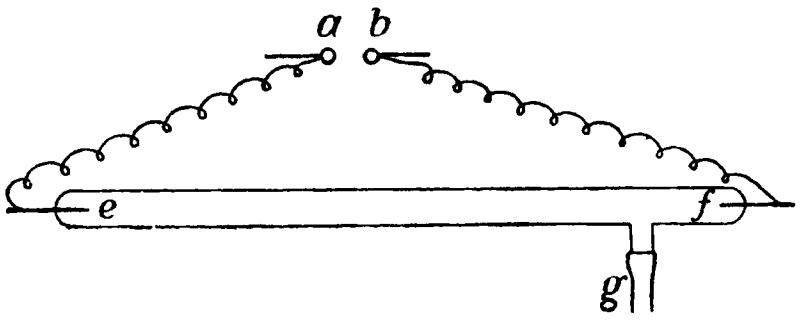


Рис. 479. Разряд в частичном вакууме.

493. Катодные лучи. Если откачать такую трубку до весьма высокой степени разрежения, например, до давления около 0,001 *мм* ртутного столаб, то характер разряда полностью изменится. Свечение почти совершенно исчезнет. Дальнейшее исследование показывает, что катод (электрод, соединенный с отрицательным электродом индукционной катушки или статической машины) испускает невидимое излучение, получившее название к а т о д н ы х л у ч е й. Эти лучи проявляются прежде всего в флюоресценции, которую они производят на стеклянных стенках трубок или на каких-либо других веществах внутри трубки, на которые они падают, затем в производимом ими значительном тепловом действии и наконец в отбрасываемой ими резкой тени.

Так, например, если отрицательный электрод вогнут, как на рис. 480, и кусочек платиновой фольги помещен в центре сферы, часть которой составляет катод, то лучи соберутся, как в фокусе, на некотором участке фольги и нагреют его до белого каления; опыт этот показывает, что катодные лучи — какова бы ни была их природа — распространяются прямолинейно и притом перпендикулярно к поверхности катода. То же самое легко показать с помощью баллона, изображенного на рис. 482. Если сделать электрод *A* катодом, а электрод *B* — анодом, то на стенку, расположенную против *A*, упадет резкая тень от кусочка платины, помещенного посередине. Этот опыт показывает, что катодные лучи в отличие от обыкновенной электрической искры проходят не между электродами, а идут по прямым от поверхности катода.

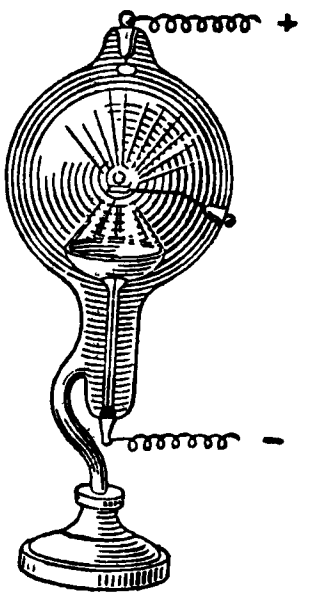


Рис. 480. Тепловое действие катодных лучей.

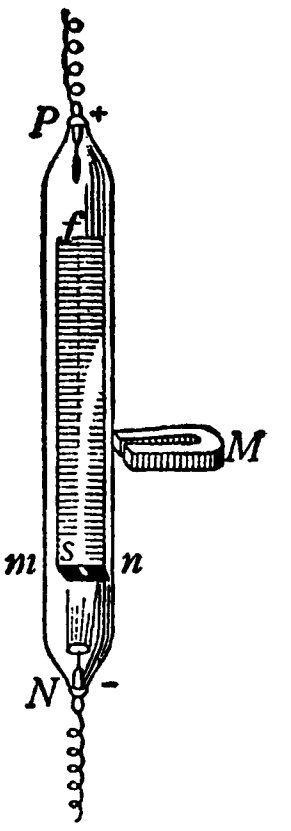


Рис. 481. Отклонение катодных лучей магнитом.

494. Природа катодных лучей. Природа катодных лучей являлась предметом долгих споров, начиная с 1875 г., когда было начато их тщательное изучение, и до 1898 г. Представители одного течения научной мысли считали катодные лучи потоком отрицательно заряженных частиц, выбрасываемых с большой скоростью из поверхности катода, другие же принимали их за особые волны, аналогичные световым, но недоступные для зрения. Следующий опыт может служить весьма убедительным подтверждением правильности первого взгляда.

NP (рис. 481) представляет собою откачанную трубку, внутри которой помещен экран *sf*, покрытый слоем какого-нибудь вещества в роде цинковой обманки, которая флюоресцирует при падении на нее катодных лучей; *mn* представляет собой полоску слюды с прорезанной в ней щелью *s*. Эта слюдяная полоска полностью поглощает все падающие на нее катодные лучи; те же лучи, которые проходят сквозь щель *s*, распространяются вдоль всей трубки, и хотя сами они невидимы, но путь их отмечен флюоресценцией, которую они производят, касаясь экрана *sf*. Если поднести теперь к трубке магнит *M*, как показано на рис. 481, то окажется, что катодные лучи отклонились и именно в том направлении, в котором они должны были отклониться, если бы они состояли из отрицательно заряженных частиц. Действительно, мы видели в §299 (стр. 213), что движущийся электрический заряд образует электрический ток, а в § 351 (стр. 257) было показано, что электрический ток, помещенный в магнитное поле, стремится двигаться в направлении, указываемом «правилом мотора». С другой стороны, совершенно неизвестно, чтобы магнитное поле оказывало какое-нибудь действие на направление распространения пучка света или какого-либо другого вида волн в эфире.

Когда в 1895 г. Дж. Дж. Томсон (Кембридж, Англия) установил, что катодные лучи отклоняются также и электрическими зарядами и притом так, как если бы они состояли из отрицательно заряженных частиц, и когда Перрен (Париж) показал, что они действительно сообщают отрицательные заряды тем телам, на которые они падают, — все возражения против корпускулярной теории, предполагавшей, что катодные лучи состоят из отрицательно заряженных частиц, полностью отпали. Масса и скорость этих частиц вычисляются из величины отклонения, испытываемого ими в магнитном и электрическом полях.

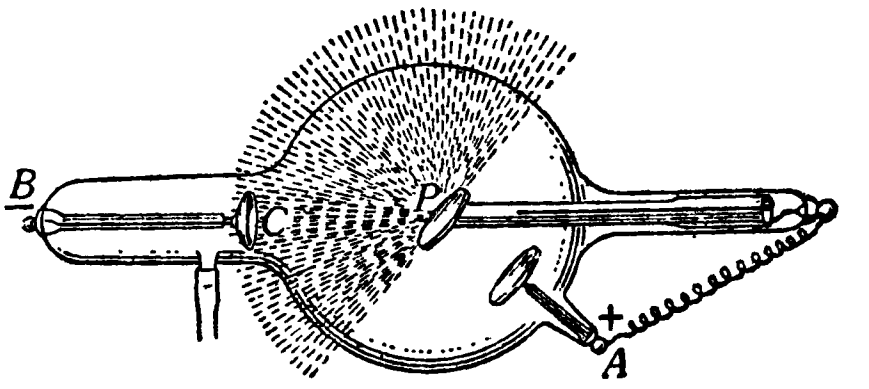


Рис. 482. Рентгеновская трубка.

В настоящее время всеми признается, что катодные лучи являются потоком электронов, выбрасываемых из поверхности катода со скоростями, которые могут достигать огромной величины в 100 000 километров в секунду.

495. Рентгеновы лучи. В 1895 г. Рентген впервые открыл, что во всех тех случаях, когда катодные лучи падают на стенки трубки или на какие-либо другие препятствия внутри трубки, появляется особое невидимое излучение, которое теперь известно под именем икс-лучей или рентгеновых лучей. В обыкновенной рентгеновской трубке (рис. 482) толстый кусок платины *P* помещен в центре и служит как бы мишенью для катодных лучей, которые, распространяясь перпендикулярно к вогнутой поверхности катода *C*, собираются, как в фокусе, в одной точке на поверхности платиновой пластинки, называемой антикатодом. В этой точке и создаются рентгеновы лучи, и отсюда они излучаются по всем направлениям. Антикатод *P* изготовляется иногда из тяжелого куска вольфрама.

Для того чтобы убедиться в справедливости того, что было сказано выше, достаточно приглядеться к работающей рентгеновской трубке. Мы увидим, что она как бы разделяется на два полушария плоскостью, в которой лежит поверхность («зеркало») антикатода (см. рис. 482). Полушарие,

заключающее пространство между катодом и источником рентгеновых лучей, светится зеленоватым флюоресцирующим светом, в то время как второе полушарие, закрытое от лучей антикатодом, остается в темноте. Передвигая флюороскоп (экран, покрытый слоем цинковой обманки) вдоль трубки, мы убедимся, что лучи, позволяющие просвечивать непрозрачные предметы, исходят из одного фокуса на антикатоде P.

496. Природа рентгеновых лучей. Хотя рентгеновы лучи и вызывают подобно катодным лучам флюоресценцию, однако во многих отношениях они существенно отличаются от катодных лучей. Прежде всего, рентгеновы лучи проходят сквозь многие вещества, которые совершенно непроницаемы для катодных лучей; так, например, они проходят сквозь стенки стеклянной трубки, в то время как катодные лучи этого обычно сделать не могут. Далее, рентгеновы лучи не отклоняются ни магнитом, ни электростатическим зарядом и, кроме того, сами они лишены какого бы то ни было электрического заряда. Таким образом, отсюда с полной определенностью вытекает, что они — в отличие от катодных лучей — не являются потоком электрически заряженных частиц.

Недавно было установлено, что рентгеновы лучи представляют собой чрезвычайно короткие волны, подобные световым, но отличающиеся от последних весьма малой длиной; при этом рентгеновы лучи могут обладать самыми разнообразными длинами волн, которые, однако, всегда короче самых крайних ультрафиолетовых лучей. Они обладают настолько малыми длинами волн, что самое гладкое зеркало, которое только может быть изготовлено, оказывается настолько неровным по сравнению с их длинами волн, что беспорядочно рассеивает эти лучи. Если воспользоваться правильным расположением молекул в кристаллах (например каменной соли, гипса, слюды), то в том случае, когда рентгеновы лучи падают на грани кристалла под некоторыми определенными углами, удается получить для этих лучей явление отражения, известное под названием интерференционного отражения от пространственной решетки. Длина рентгеновых лучей представляет собой ничтожно малую величину порядка стомиллионных долей сантиметра, что соответствует частоте колебаний в секунду, равной $3{,}10^{18}$.

497. Ионизация газов рентгеновыми лучами. Одним из замечательных свойств рентгеновых лучей является их способность — наряду с катодными лучами — заставлять любое наэлектризованное тело, на которое они падают, медленно терять свой заряд.

Для того чтобы убедиться в этом, заставим рентгеновскую трубку работать на расстоянии $1{,}5 - 3$ *м* от заряженного электроскопа с золотыми листочками. Листочки сразу же начнут сближаться.

Причина этого заключается в том, что рентгеновы лучи отрывают электроны от атомов газа, или, как говорят, ионизируют газ и таким образом наполняют последний положительно и отрицательно заряженными частицами; в момент своего образования каждая отрицательная частица представляет собою электрон, а каждая положительная частица — атом, у которого был отнят электрон. Поэтому любое заряженное тело, помещенное в газ, будет притягивать к себе заряды, знак которых противоположен его собственному, и таким образом будет разряжаться.

498. Рентгеновские снимки. Наиболее замечательным свойством рентгеновых лучей является их способность проходить сквозь многие вещества, совершенно непрозрачные для света, как, например, картон, дерево, кожу и мясо. Так, например, если положить руку на кассету с находящейся в ней фотографической пластинкой и затем подвергнуть действию рентгеновых лучей, то на пластинке получится теневой снимок более плотных частей руки, т. е. костей.

Недавно были открыты лучи, подобные рентгеновым, попадающие на землю по всем направлениям из окружающего пространства, которые обладают еще большей проницающей способностью, причем длины их волн составляют не более 0,002 длины волны самых коротких рентгеновых лучей.

РАДИОАКТИВНОСТЬ.

499. Открытие радиоактивности. В 1896 г. Анри Беккерель в Париже произвел следующий опыт: он обернул фотографическую пластинку куском совершенно непрозрачной черной бумаги, положил на бумагу монету и подвесил над монетой небольшой кусок минерала урана. Затем он перенес все в темную комнату и оставил там на несколько дней. Когда он проявил фотографическую пластинку, то обнаружил на ней теневой снимок монеты, подобный рентгеновскому снимку.

Он заключил отсюда, что уран обладает свойством самопроизвольно испускать какие-то лучи, которые подобно рентгеновым лучам способны проникать сквозь непрозрачные предметы и производить действие на фотографическую пластинку.

Далее Беккерель нашел, что эти лучи, названные им урановыми лучами, сходны с рентгеновыми лучами в том отношении, что они разряжают все наэлектризованные тела, на которые они падают. Он установил также, что эти лучи испускаются всеми соединениями урана.

500. Радий. Через несколько месяцев после открытия Беккереля Мария Кюри принялась за исследование всех известных химических элементов с целью установить, какие из них обладают замечательным свойством, найденным у урана. Она нашла, что один из известных элементов, а именно торий, являющийся главной составной частью ауэровских колпачков для газовых горелок, способен, так же как и все его соединения, производить то же самое действие. После этого открытия лучи от всех подобного рода веществ стали называть беккерелевыми лучами, а все вещества, испускающие такие лучи, — радиоактивными веществами.

Однако в связи с этим исследованием Кюри заметила, что смоляная руда, из которой извлекался уран и которая главным образом состояла из окиси урана, разряжает электроскоп в четыре раза скорее, чем чистый уран. Она заключила отсюда, что радиоактивность смоляной руды обусловлена не только содержащимся в ней ураном

и что, следовательно, смоляная руда должна содержать какой-то дотоле неизвестный элемент, являющийся значительно более сильным источником беккерелевых лучей, чем уран или торий. После долгих и весьма трудных поисков ей удалось выделить из нескольких тонн руды несколько сантиграммов нового элемента, который разряжал электроскоп более чем в миллион раз скорее, чем уран или торий. Кюри назвала этот элемент радием.

501. Природа беккерелевых лучей. Несмотря на свое сходство с рентгеновыми лучами, выражающееся в одинаковой с ними способности воздействовать на фотографическую пластинку, вызывать флюоресценцию и разряжать наэлектризованные тела, лучи, испускаемые радиоактивными веществами, все же отличны от них по своей природе.

Это отличие находит себе подтверждение хотя бы в том, что беккерелевы лучи отклоняются как магнитным, так и электрическим полем, и кроме того, сообщают телам, на которые они падают, электрические заряды. Факты эти неизбежно приводят к заключению, что радиоактивные вещества сами выбрасывают из себя электрически заряженные частицы.

Однако опыт, произведенный в 1899 г. Э. Рёдзерфордом, показал, что беккерелевы лучи на самом деле состоят из трех различных видов излучения, которые он назвал лучами альфа, бета и гамма. Лучи бета оказались во всех отношениях аналогичными катодным лучам, т. е. они представляют собой поток электронов, которые выбрасываются с различными скоростями, колеблющимися от 100 000 до 299 000 *км* в секунду.

Лучи альфа отличаются от них значительно меньшей проницающей способностью, гораздо большей ионизирующей способностью, т. е. способностью делать газы проводниками; кроме того, они в гораздо меньшей степени отклоняются в магнитном и электрическом полях, причем направление отклонения противоположно тому направлению, в котором отклоняются лучи бета.

Из этого факта, открытого Рёдзерфордом в 1903 г., легко вывести заключение, что лучи альфа состоят из положительно заряженных частиц; из величины отклонения в магнитном и электрическом полях было вычислено, что масса их в четыре раза больше массы атома водорода, т. е. почти в 7 500 раз превосходит массу электрона; скорость же частиц альфа составляет около 35 000 *км* в секунду.

Рёдзерфорду и Болтвуду удалось собрать частицы альфа в достаточном количестве и окончательно установить, что они являются положительно заряженными атомами гелия.

Разница в массе между частицами альфа и бета объясняет, почему последние обладают лучшей проницаемостью, чем первые, и наоборот, почему частицам альфа лучше, чем частицам бета удается вырывать электроны из молекул газа и делать его проводящим. Листочек алюминиевой фольги толщиною в 0,005 *см* совершенно не пропускает

лучей альфа, между тем как такой же листочек не представляет почти никакого препятствия для лучей бета и гамма.

Лучи гамма обладают гораздо большей проницающей способностью, чем даже лучи бета; они совершенно не отклоняются в магнитном или электрическом поле. Лучи гамма, подобно рентгеновым лучам, представляют собой аналогичные световым волны, причем длина волн лучей гамма значительно меньше длин волн рентгеновых лучей. Как предполагают, лучи гамма производятся столкновениями частиц бета с окружающей материей.

502. Спинтарископ Крукса. В 1903 г. Уильям Крукс построил небольшой прибор, названный спинтарископом, который позволяет непосредственно убедиться в том, что радий непрерывно выбрасывает из себя частицы, движущиеся с огромными скоростями. В спинтарископе крупинка радия R (рис. 483) помещена на расстоянии одного миллиметра над экраном, покрытым цинковой обманкой; для наблюдения за экраном служит лупа L с линейным увеличением от 10 до 20. Непрерывное слабое свечение экрана, заметное невооруженным глазом, превращается под лупой в сотни мельчайших световых вспышек. Явление имеет такой вид, как если бы экран подвергался непрерывной бомбардировке дождем снарядов, причем каждое попадание отмечается такой же световой вспышкой, как при ударе кремнем о сталь. Опыт этот является прямым и весьма убедительным доказательством того, что радий непрерывно выбрасывает из себя частицы, вылетающие с огромными скоростями. Вспышки происходят при ударах частиц альфа, а не бета об экран, покрытый слоем цинковой обманки.

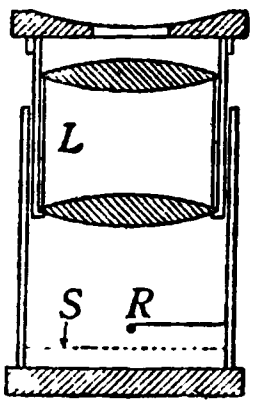
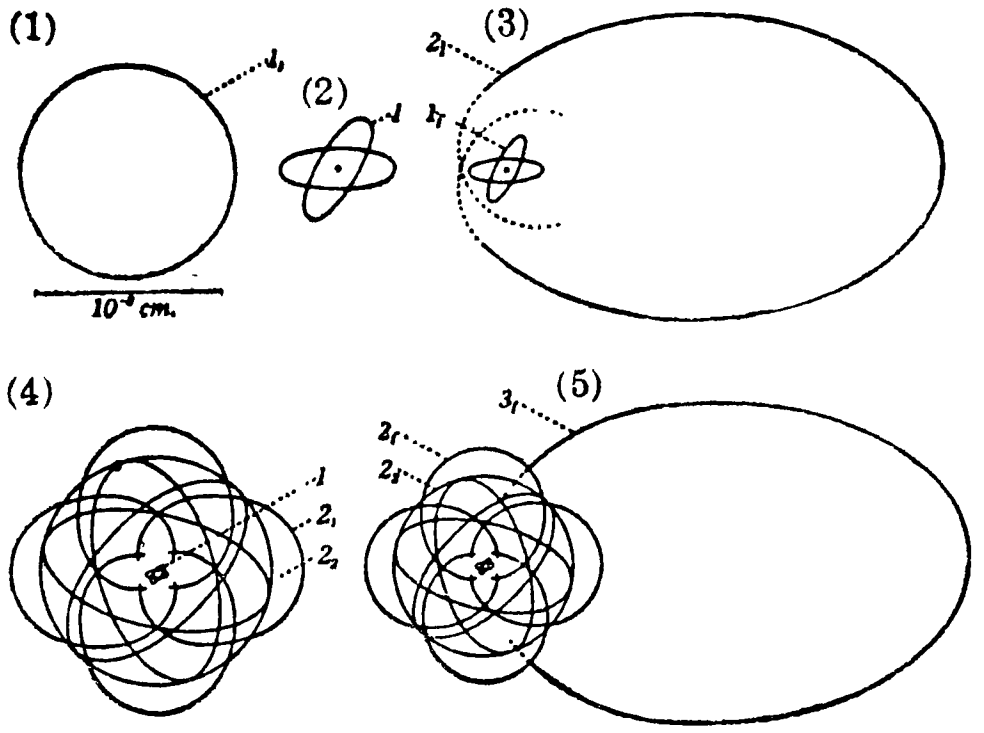


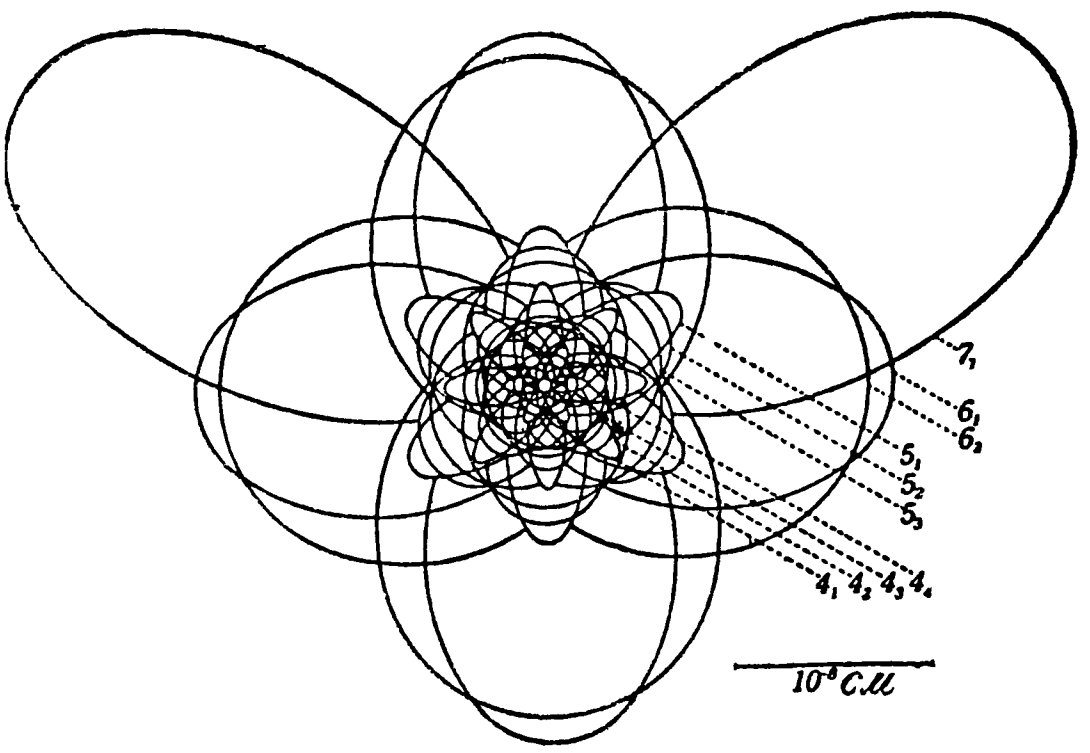
Рис. 483. Спинтарископ Крукса.

Смесь, составленная из какого-нибудь соединения радия и цинковой обманки, светится непрерывно и применяется для стрелок и циферблатов аэронавигационных приборов, компасов и часов, так же как и для прицельных приспособлений в артиллерии, при пользовании ими в ночной темноте.

503. Распад радиоактивных веществ. Какова бы ни была истинная причина непрерывного испускания частиц радиоактивными веществами, испускание это во всяком случае не может быть вызвано никакими химическими реакциями; дело в том, что после открытия активных свойств тория Кюри сейчас же показала, что активность всех радиоактивных веществ попросту пропорциональна количеству присутствующего активного элемента и совершенно не зависит от природы того химического соединения, в состав которого входит рассматриваемый элемент. Более того, оказалось, что радиоактивность совершенно не зависит ни от каких физических и химических условий. Самые низкие, так же как и самые высокие температуры, какие только могут быть достигнуты, не оказывают ни малейшего влияния на ход радиоактивных явлений. Следовательно радиоактивность является столь же неизменным свойством радиоактивных веществ, как, например, их масса. В настоящее время установлено, что атомы радиоактивных веществ распадаются на более простые атомы. Атомы урана и тория являются самыми тяжелыми среди атомов всех элементов. В силу каких-то нам пока неизвестных причин они становятся неустойчивыми и выбрасывают из себя часть своей массы в виде частиц альфа. Оставшаяся часть атома после такого внутриатомного взрыва представляет собой новое вещество, химические свойства которого резко отличаются от свойств первоначального атома. Этот новый атом, вообще говоря, также неустойчив и в свою очередь пре-

вращается путем распада в другой атом. Процесс этот происходит до тех пор, пока путем постепенных превращений не достигается устойчивый вид атома. Иногда во время таких внутриатомных катастроф из атома вылетают также и электроны, которые представляют собой лучи бета.





СТРОЕНИЕ АТОМА.

Ныне считается твердо установленным, что атом состоит из положительно заряженного ядра, содержащего определенное число свободных, т. е. не нейтрализованных положительных зарядов (это число равно 1 у водорода и 92 у урана), и окруженного таким же количеством отрицательных электронов, сдерживаемых притяжением положительного ядра. Отрицательные электроны, по всей вероятности, движутся вокруг ядра по орбитам. Относительно формы этих орбит известно очень мало и еще меньше—относительно их ориентации. На рисунке дана гипотетичная схема орбит электронов вокруг ядра для водорода (1), гелия (2), лития (3), неона (4), натрия (5), радия (6).

Согласно этой точке зрения, которая в настоящее время является общепринятой, радий представляет собой просто один из этапов распада (дезинтеграции) атома урана. Атомный вес урана равен 238; атомный вес радия — 226, атомный вес гелия — 4,00. Таким образом, если бы уран потерял 3 атома гелия, то он превратился бы в радий. Уран распадается чрезвычайно медленно. Время, потребное для того, чтобы распалась половина данного количества урана, так называемый п е р и о д урана, составляет 4 500 000 000 лет (4,5 миллиарда лет).

Между ураном и радием имеются четыре радиоактивных элемента, периоды которых равны соответственно 23,8 дня, 1,15 минуты, 2 000 000 лет и 90 000 лет. Период радия равен 1 580 годам. Кроме того, за радием следуют друг за другом еще девять радиоактивных элементов.

Конечным продуктом распада является свинец, который, повидимому, устойчив. Периоды промежуточных веществ лежат в пределах от 0,000001 секунды для *RaC'* до 16 лет для *RaD*.

Для большинства же остальных радиоактивных веществ периоды составляют от нескольких минут до нескольких дней.

504. Внутриатомная энергия. В 1903 г. французские ученые К ю р и и Л а б о р д сделали замечательнейшее открытие. Они

нашли, что радий непрерывно выделяет теплоту в количестве 100 калорий в течение часа на грамм. Более поздними измерениями было найдено 118 калорий.

Собственно говоря, этот результат можно было предвидеть хотя бы на основании того факта, что частицы, непрерывно вылетающие из атомов радия при их распаде, производят внутри вещества бомбардировку, которая, очевидно, и должна вызвать нагревание. Точное измерение количества тепла, выделяющегося в течение часа, позволяет определить, какое количество тепловой энергии выделяется при распаде одного грамма радия. В результате получается около 2 000 000 калорий, т. е. в 300 000 раз больше того, что получается при сжигании одного грамма угля. Кроме того, весьма вероятно, что подобные же огромные количества энергии запасены в атомах в с е х вообще веществ, может быть, в форме кинетической энергии вращения электронов. Наиболее животрепещущим вопросом, с которым неизбежно встретится физика будущего, будет решение проблемы о возможности распоряжаться внутриатомной энергией и использовать ее для технических целей.

В настоящее время трудно и даже невозможно представить себе направление, в котором следует искать решение этого вопроса; однако нужно помнить, что и те результаты, к которым привело изучение физики за последние сто лет, показались бы столь же невероятными людям прошлого века.

РАЗВИТИЕ ФИЗИКИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 30 ЛЕТ.

505. Эволюция химических элементов. Тридцать лет тому назад предполагалось, что весь мир с о с т о и т и з о п р е д е л е н н о г о ч и с л а (70 с л и ш н и м) в е ч н ы х н е и з м е н н ы х э л е м е н т о в. В настоящее время благодаря открытию радиоактивности создалось представление о непрерывном развитии всего мира и отдельных его частей вплоть до химических элементов; из старых элементов в роде урана и тория непрерывно создаются новые, как, например, свинец; но даже эти элементы — уран и торий — в свою очередь, должно быть, создаются где-нибудь во вселенной из других элементов.

506. Положительные и отрицательные электроны. Тридцать лет тому назад ничего не было известно об а т о м и с т и ч е с к о м с т р о е н и и э л е к т р и ч е с т в а. В настоящее же время окончательно установлено, что оно состоит из отдельных частиц, половина которых имеет положительный заряд, а половина — отрицательный, но величина этого заряда у всех частиц одинакова. Отрицательно заряженная частица называется э л е к т р о н о м. Наиболее точные измерения заряда электрона дали значение в $4{,}774.10^{-10}$ абсолютных электростатических единиц.

Масса положительного электрона (называемого иногда протоном) оказалась в 1 845 раз больше массы отрицательного электрона; таким образом, носителями всей массы любого тела являются практически только содержащиеся в нем положительные электроны (протоны).

507. Атомные номера. Тридцать лет тому назад ничего не было известно о том, сколько вообще может существовать различных химических элементов. В настоящее время с полной определенностью известно, что во вселенной имеются 92 различных химических элемента; далее установлено замечательно простое спектроскопическое свойство, которое, изменяясь от элемента к элементу, проходит как раз 92 отдельных этапа от самого легкого элемента — водорода до самого тяжелого — урана, и нам точно известно, какой элемент соответствует каждой такой ступени. Порядковый номер, указывающий место этой ступени в ряду чисел от 1 до 92, называется атомным номером соответствующего элемента.

508. Строение атома. Тридцать лет тому назад ничего не было известно относительно строения атома. В настоящее время установлено, что в каждом атоме имеется сравнительно тяжелое ядро, которое обладает, однако, чрезвычайно незначительными размерами и в котором сосредоточены все положительные электроны (протоны) данного атома; число этих протонов в точности равно атомному весу. Протоны сдерживаются вместе находящимися внутри ядра отрицательными электронами, число которых равно разности между атомным весом и атомным номером. Так как весь атом в целом электрически нейтрален, то, следовательно, атомный номер равняется числу «внешних» электронов, окружающих ядро и притягиваемых последним, с другой стороны он равняется числу протонов, которые образуют положительный заряд ядра. Объем ядра по отношению к объему всего атома представляет сравнительно меньшую часть, чем объем Солнца по отношению к объему солнечной системы.

509. Электронные орбиты. Тридцать лет тому назад ничего не было известно относительно поведения электронов внутри атома. В настоящее время мы предполагаем, хотя и не имеем в этом полной уверенности, что каждый из внешних электронов вращается вокруг ядра по замкнутой орбите, подобно тому как Земля обращается вокруг Солнца. Число таких орбитальных электронов равно 1 в случае водорода и 92 — в случае урана. Вид этих предполагаемых орбит в различных атомах изображен на рис. стр. 382.

510. Взаимодействие световых волн и электронов. Тридцать лет тому назад ничего не было известно, как ведут себя электроны в процессах поглощения или испускания световых волн.

В настоящее время выяснено, что в тех случаях, когда поглощение атомом световой волны частоты ν сопровождается выбрасыванием из него электрона, последнему всегда сообщается кинетическая энергия, пропорциональная ν или равная $h\nu$; и обратно, если атомом испускается световая волна частоты ν, то электроны внутри атома перестраиваются таким образом, чтобы разность между энергиями до и после испускания в точности равнялась $h\nu$.

511. Космические лучи. Тридцать лет тому назад ничего не было известно о существовании космических лучей, приходящих на землю по всем направлениям из глубин мирового пространства и созда-

ваемых радиоактивными (т. е. внутриядерными) изменениями, сопровождаемыми выделениями энергии, которые соответствуют величине энергии, приобретенной электроном, прошедшим разность потенциалов в 30 000 000 вольт.

В настоящее время можно считать строго установленным существование этих таинственных сверхрентгеновых лучей, которые пронизывают насквозь 2 *м* твердого свинца.

512. Практическая ценность физики. Тридцать лет тому назад никто даже не предполагал возможности какого-либо практического применения наших современных или будущих знаний об электронных явлениях. В настоящее время вся радиотехника, значительная часть проволочной связи, особенно в телефонных линиях на далекие расстояния, все аппараты для передачи изображений на расстояние и еще многое другое, основаны на применении электронных явлений. И если окинуть взором все, что физикой сделано, делается и будет сделано в будущем для мирового прогресса, то невозможно не оценить ее значения и не почувствовать особого очарования, присущего этой науке.

ПРИЛОЖЕНИЕ.

Дополнительные вопросы и задачи.

ГЛАВА I. 1. Сколько метрических тонн весит свинцовый куб, ребро которого равно 2 *м?*

2. В цилиндрический сосуд налит 1 *кг* спирта. Высота уровня его в сосуде равна 8 *см*. Найдите площадь поперечного сечения сосуда.

3. Какова длина свинцового стержня, диаметр которого 1 *см*, а вес равен 1 *кг?*

4. Сосуд, наполненный ртутью, весит 700 *г*. Тот же сосуд без ртути весит 20 *г*. Найдите емкость сосуда (в *куб. см*).

ГЛАВА II. 1. В плавательном бассейне устроено покатое дно, длина которого — 25 *м*, а ширина — 10 *м*. На одном конце бассейна глубина воды — 3 *м*, а на другом — 1,3 *м*. Определите, с какой силой действует вода на все дно; на тот край бассейна, где глубина воды — 3 *м*.

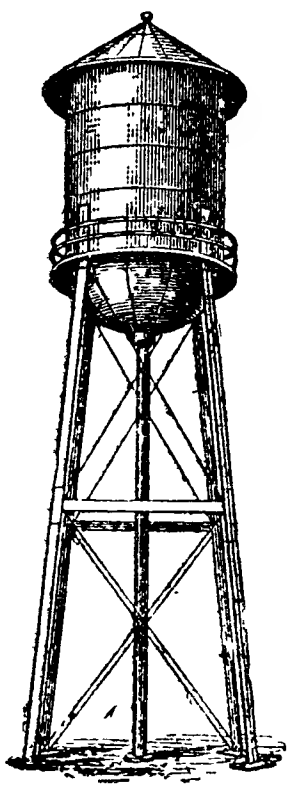


Рис. 484.

2. В сети удалось поймать рыбу на глубине $1^1/_2$ *км*. Каково давление воды на этой глубине? (Удельный вес морской воды = 1,026).

3. Сорок лет тому назад главная водопроводная труба обычно представляла собой вертикальный цилиндр. В настоящее время ей большей частью придают форму, показанную на рис. 484.

Каковы преимущества той и другой формы?

4. Какое необходимо давление, чтобы поднять воду на верхний этаж? Вульвортс Бюльдинг в Нью-Йорке — здания вышиной в 260 *м?*

5. Пусть площадь основания сосуда, изображенного на рис. 13 (1) равна 200 *кв. см*, а высота воды в нем — 100 *см*. С какой силой давит вода на дно сосуда?

6. Положим, что вес пустого сосуда на рис. 13 (1) мал по сравнению с весом содержащейся в нем воды. Что будет тогда больше: сила, с которой вода давит на дно сосуда, или сила, необходимая, чтобы поднять сосуд с водой? Разберите подробно.

7. Диаметр одного из поршней гидравлического пресса равен 2,5 *см*. Когда к этому поршню прилагается сила в 5 *кг*, весь пресс производит давление с силой в 5 000 *кг*. Чему равен диаметр большого поршня?

8. Удельный вес молока равен 1,032. Как меняется его удельный вес при удалении сливок? При прибавлении воды? Можно ли проделать с молоком и то, и другое, но так, чтобы его удельный вес не изменился?

9. Камень весит 300 *г*. Объем его равен 90 *куб. см*. Каков будет кажущийся вес этого камня, если погрузить его в керосин, удельный вес которого 0,79?

10. Брусок дерева, размерами 15 *см* × 10 *см* × 4 *см*, плавает в воде, причем над водой находится 1 *см*. Найдите вес бруска и удельный вес этого сорта дерева.

ГЛАВА III. 1. Объясните, каким образом воздух проникает в легкие; почему лимонад поднимается по соломинке.

2. Возьмите мокрый кожаный кружок, прикрепите к нему веревочку и прижмите его к плоскому гладкому камню (см. рис. 485).

Часто удается приподнять камень, потянув за веревочку. Почему камень не отделяется при этом от кожи?

3. Почему чернила не выливаются из пневматической чернильницы? (см. рис. 486).

4. Предположим, что в пространство над ртутным столбом в барометре каким-то образом попало небольшое количество воздуха. Как изменились бы показания барометра? Почему?

5. Давление 76 *см* ртутного столба равно 1 атмосфере. Какова должна быть высота столба воды, чтобы давление его было равным 1 атмосфере? 2 атм.? 3 атм.? (Уд. вес ртути = 13,6).

6. Рассчитайте, с какой силой (в тоннах) давит атмосфера на крышу дома, если площадь крыши равна 18 *м* × 30 *м*. Почему крыша не проваливается?

7. Глэйшер и Коксвель поднялись на своем воздушном шаре до такой высоты, где барометрическое давление равнялось всего 18 *см* Сколько вдохов должны были они делать на этой высоте, чтобы вдохнуть столько же воздуха, сколько они могли бы вдохнуть на поверхности земли при одном вдохе?

8. На поверхность земли 1 *куб. см* воздуха весит 0,00129 *г*. Если бы плотность воздуха была одинаковой на любой высоте, то на сколько километров простиралась бы высота атмосферы?

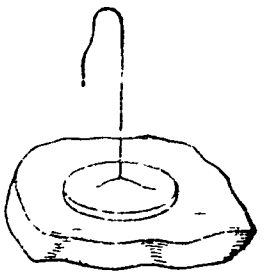


Рис. 485.

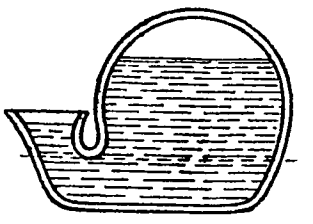


Рис. 486.

9. До какой высоты поднимет воду нагнетательный насос, расположенный на вершине горы, где барометр показывает 71 *см?*

10. Предположим, что объем воздушного мешка водолаза равен 0,05 *куб. м* и содержит воздух под давлением в 40 атмосфер. До какого объема расширится этот воздух, если он будет выпущен из мешка на глубине 11 *м* под водой?

11. В газовом резервуаре емкостью в 0,05 *куб. см* содержался ацетилен при давлении в 154 *кг* на *кв. см*. Через некоторое время давление в резервуаре понизилось до 70 *кг* на *кв. м*. Сколько ацетилена было использовано за это время?

ГЛАВА IV. 1. Наполним водородом, сжатым до 2 атмосфер, сосуд, имеющий небольшую течь. Давление водорода упадет до 1 атм., примерно, в 4 раза быстрее, чем если этот же опыт будет проделан с воздухом. Почему?

2. Найдите давление, которому подвергался водолаз, опустившийся до глубины в 100 *м*. Какова была плотность воздуха, находящегося в его костюме, если плотность воздуха на поверхности была 0,00128 *г* на *куб. см*. Температуру полагайте постоянной. Атмосферное давление на поверхности считайте равным 75 *см*.

ГЛАВА V. 1. На наклонной плоскости, длина которой 4 *м*, а высота — 1 *м*, удерживают кусок льда, весящий 100 *кг*. Найдите составляющую веса льда, стремящуюся заставить лед катиться по наклонной плоскости. Какую силу надо прилагать к куску льда, чтобы удержать его в покое? Какова величина составляющей веса льда, стремящейся прижать его к наклонной плоскости?

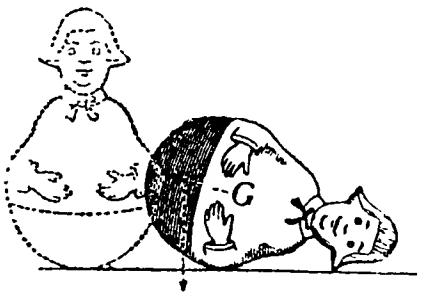


Рис. 487.

2. Мальчик втаскивает нагруженные санки, весящие 100 *кг*, на холм, высота которого относится к длине наклона, как 1 к 5. Положим, что трением можно пренебречь. Какую силу должен прилагать мальчик?

3. Человека спустили на скалу на канате, длина которого 170 *м*. Каков был период этого «маятника»?

4. Объясните, почему «ванька-встанька» (рис. 487) не остается лежать на боку, а возвращается в вертикальное положение. Поднимается ли его центр тяжести?

5. Где находится центр тяжести обруча? Кубической коробки? Когда эта последняя более устойчива: когда она пустая или когда она наполнена? Почему?

6. Где должен находиться центр тяжести коромысла весов по отношению к поддерживающей призме *C*? (рис. 5).

7. Тело находилось в покое и затем начало двигаться равномерно ускоренно, причем скорость его в 5 сек. увеличивалась на 20 *м* в сек. Найдите:

1) ускорение, 2) среднюю скорость в течение этих 5 сек., 3) путь, пройденный телом в течение 5 сек.

8. Вагон, находившийся в покое, начинает двигаться с ускорением 80 *см/сек*. В течение какого времени пройдет он 30 *м?*

9. Пуля, вылетевшая из ружья вертикально вверх, ударилась о землю через 10 сек. До какой высоты поднялась пуля? Какова была ее начальная скорость?

10. Какая сила поддерживает аэроплан во время полета?

11. Положим, что с потолка движущегося вагона на пол брошен некоторый груз. Ударится ли этот груз в ту точку пола, которая находится как раз под точкой, откуда он был брошен?

12. Если сбросить с башни два шара: один — горизонтально, а другой — прямо вниз, то который первым достигнет земли? (Вспомним, что ускорение, умноженное на силу, имеет направление этой силы и пропорционально ей, независимо от того, движется ли тело, или покоится. См. второй закон движения). Если возможно, попробуйте произвести опыт, указанный на рис. 488.

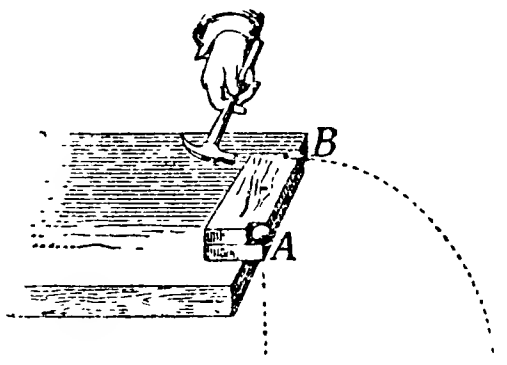


Рис. 488.

13. Военный аэроплан летит при отсутствии ветра со скоростью 90 *км* в час на высоте 530 *м* и бросает оттуда бомбы. Насколько должна бомба опережать мишень, чтобы попасть в цель?

14. Пуля, весящая 10 *г*, вылетела из ружья, весящего 5 *кг*, со скоростью 400 *м* в сек. Какова скорость отдачи ружья?

15. Если упряжка лошадей тянет вагон с силой в 250 *кг*, то с какой силой тянет вагон упряжку в обратную сторону? Почему колеса поворачиваются раньше, чем начнут скользить подковы лошадей?

16. Почему яблоко, падающее вам на голову, действует с силой, превышающей его вес?

ГЛАВА VI. 1. Одна проволока вдвое толще другой из того же материала. Во сколько раз больший груз может она выдержать?

2. Какова должна быть площадь поперечного сечения медной проволоки, чтобы она разрывалась при такой же нагрузке, как железная проволока сечением в 1 *кв. мм?* (см. § 109).

3. Расскажите, каким образом можно, пользуясь законом Гука и имея в руках гирю в 10 *кг*, изготовить шкалу для пружинных весов, годных для грузов до 16 *кг?*

4. Объясните, какую пользу приносит волосность при употреблении стальных перьев, фитилей и губок.

5. На кончике зубочистки поднесите кусочек камфары к сосуду с чистой водой и осторожно положите этот кусочек на поверхность воды. Объясните, почему он начнет двигаться.

6. Как определить: поднимаются ли со дна подогреваемого сосуда с водой пузырьки воздуха или пара?

ГЛАВА VII. 1. Стальной стержень цилиндрической формы имеет в длину 7 *м* и весит 50 *кг*. Какое количество работы потребуется, чтобы из горизонтального положения поставить его в вертикальное, причем один конец стержня все время будет находиться на земле?

2. Положим, что все 20 000 жителей какого-нибудь города потребляют в среднем 10 *кг* воды в день на человека. Сколько *кг-м* работы производят двигатели за день, если воду надо поднимать на высоту 75 *м?*

3. Каким образом можно пользоваться ломом в качестве рычага 1-го рода при опрокидывании тяжелых предметов? в качестве рычага 2-го рода?

4. На плоской крыше лежит доска длиною в 7 *м* и весом в 100 *кг*. Эта доска одним концом на 2,5 *м* выдается за край крыши. На доске, на расстоянии 30 *см* от другого ее конца, лежит мешок с гвоздями, весящий 25 *кг*. До какого места на выдающемся над крышей конце доски может, не опрокидывая доски, дойти человек, весящий 90 *кг?*

5. На рис. 489 показано устройство предохранительного клапана с грузом. Пусть *ab* равно 4 *см*, а *bc* — 38 *см*. Какое нужно давление пара на *кв. см*, чтобы открыть этот клапан, если площадь клапана равна 6 *кв. см*, а вес шара = 2 *кг?*

6. На рис. 490 изображены весы для взвешивания сена. Они состоят из сложного рычага, с точками опоры в F, F', F'', F'''. Пусть $Fo = F'o' = 15$ *см*, $FE = F'E = 1{,}5$ *м*, $F''n = 30$ *см*, $F''m = 2$ *м*, $rF''' = 5$ *см* и $F'''s = 50$ *см*. Каков должен быть груз W, чтобы уравновесить груз в одну тонну, находящийся на платформе?

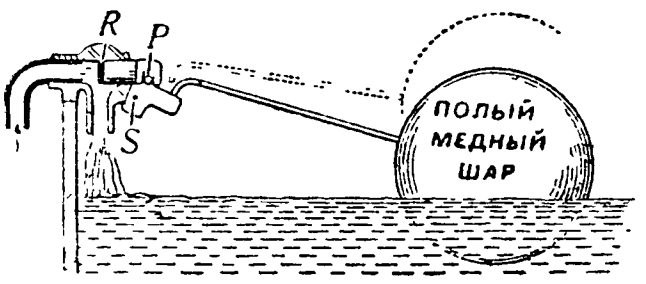


Рис. 489.

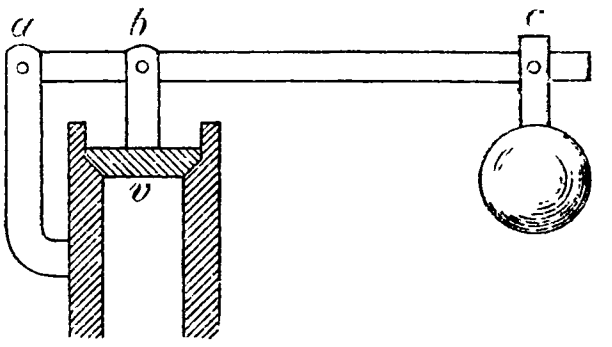


Рис. 490.

7. Пусть у крана, изображенного на рис. 491, длина рукоятки равна $^1/_2$ *м*, а зубчатые колеса A, B, C и D имеют, соответственно, 12, 48, 12 и 60 зубцов. Радиус оси, по которой движется цепь, положим равным 10 *см*. Каков у этого крана выигрыш в силе?

8. Человек, весом в 99 *кг*, поднялся по лестнице, высота которой 170 *м*, в 10 мин. С какой мощностью работал он в это время? (В *кг-м* и в л. с.). С какой мощностью работал бы он, если бы поднялся в течение 20 *м*?

9. Пуля вылетела из пушки со скоростью 530 *м* в сек. и достигла высоты в 6 *км*. Пусть вес снаряда равен 500 *кг*; какова его кинетическая энергия? Потенциальная энергия?

10. Надо наполнить водой резервуар, вмещающий 2 000 бочек, и находящийся на высоте 10 *м*. Положим, что бочка с водой весит 130 *кг*. Какую придется произвести работу, чтобы наполнить весь резервуар? Если делать это с помощью моторного насоса, мощность которого равна 4 л. с., то во сколько минут наполнится весь резервуар?

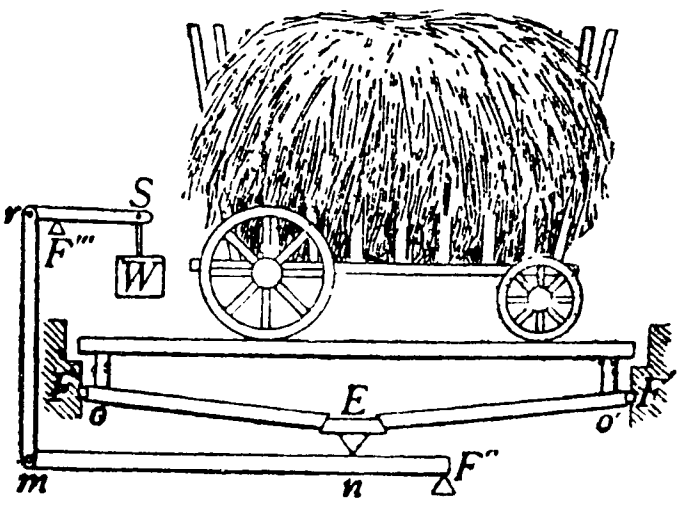


Рис. 491.

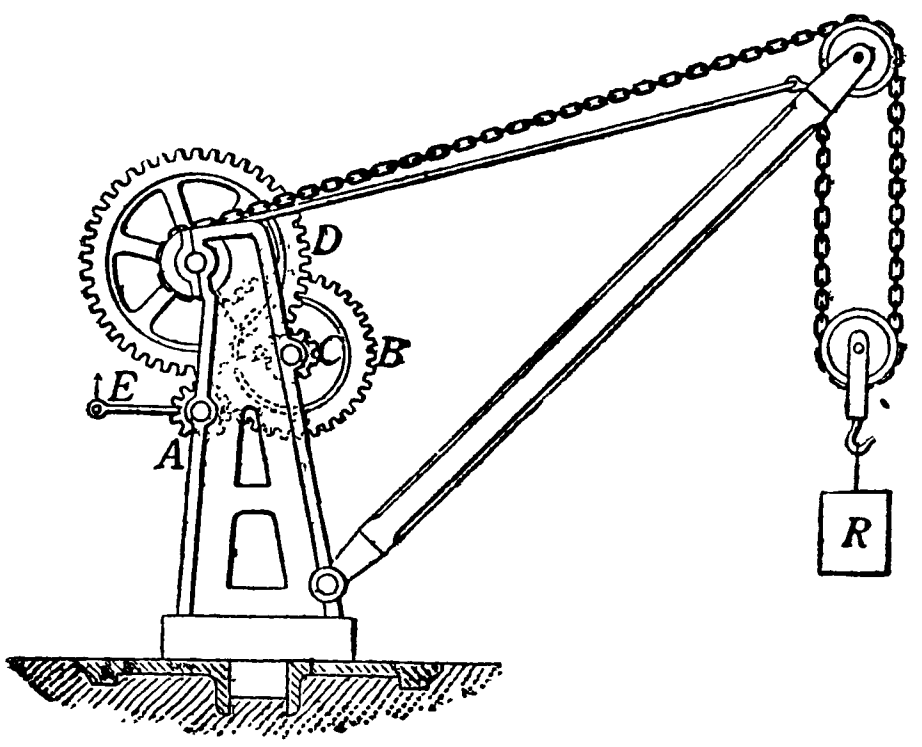


Рис. 492.

11. Двигатель аэроплана развивает мощность в 150 л. с. при скорости полета в 180 *км* в час. Какова при этом сила, с которой пропеллер толкает аэроплан назад?

12. Дан гладкий параллелепипед размерами в $25 \times 20 \times 7$ *см*. Найдите, какие расстояния пройдет он, если поместить его на гладкий лед и толкнуть, причем лежит он последовательно на сторонах с площадью 25×20; 20×7; 25×7.

13. Мощность турбин на Ниагарской гидростанции равна 70 000 л. с. Их коэффициент полезного действия — 93%. Высота воды — 70 *м*. Силу скольких *куб. м* воды использует каждая турбина в 1 минуту?

14. Положим, что для подъема груза в 150 *кг* приходится прилагать к полиспасту силу в 50 *кг* на протяжении 2 *м*. Каков коэффициент полезного действия этой системы?

15. Водопад льется с высоты 7 *м*, причем в каждую секунду через него проходит 2,7 *куб. м* воды. Сколько л. с. могло бы развить водяное колесо с коэффициентом полезного действия, равным 80%, если бы оно утилизировало всю эту падающую воду?

ГЛАВА VIII. 1. Нормальная температура тела человека — 98,6 Ф. Сколько это по Цельсию?

2. Шарики двух термометров имеют одинаковые размеры. Но диаметр капилляра одного термометра в два раза больше, чем у другого. Как относятся между собой длины этих термометров в интервале от 0° до 100°?

3. В автомобильной шине находился воздух под давлением в 6 *кг* на *кв. см* при температуре 20° С. Во время хода автомобиля температура воздуха повысилась до 35° С. Насколько увеличилось его давление внутри шины?

4. Нагреем 2 *л* воздуха, находящегося под атмосферным давлением и при температуре 20° С, пока и объем его и давление удвоятся. Какова будет теперь его температура?

5. При опускании шарика термометра в горячую воду ртуть сначала немножко опускается, а потом уже начинает подниматься. Почему?

6. Выведите из уравнения (5) § 178, что можно определить коэффициент линейного расширения, как увеличение длины, приходящееся на единицу длины и на один градус.

7. Если стальной стержень равен в точности 30 *м* при 20° С, то насколько короче будет он при 0° С?

8. Пусть годовое колебание температуры равно 50° С. Какой зазор надо оставлять между концами стальных рельсов, если прокладывать их в самое холодное время года?

ГЛАВА IX. 1. Метеориты представляют собой маленькие, холодные тела, движущиеся в пространстве. Почему, попадая в земную атмосферу, они загораются?

2. Разберите все превращения энергии, при выстреле из ружья вертикально вверх.

3. Докажите, что энергия водопада является попросту видоизмененной энергией солнечного излучения.

4. При опытном определении механического эквивалента теплоты было найдено, что температура 100 *г* воды повысилась на 5,85° С вследствие работы, произведенной массой в 10 *кг*, падающей с высоты 25 *м*. Вычислите, чему равен механический эквивалент теплоты.

5. Сколько нужно калорий, чтобы нагреть кусок железа, весящий 3 *кг*, с 20° С до 60° С?

6. В медный котел, весом в 1,2 *кг*, налито 4 *кг* воды. Сколько надо калорий, чтобы нагреть воду в котле с 20° С до 50° С? Предположим, что на это нагревание потрачено 0,01 *куб. м* газа и что каждый *куб. см* газа при сгорании потребляет 504 калории. Каков коэффициент полезного действия нагревательного аппарата?

7. Медный калориметр, масса которого равна 200 *г*, содержит 150 *г* воды при 8°С. В этот калориметр опускают 300 *г* свинцовой дроби, предварительно опущенной на некоторое время в кипящую воду. Какова будет теперь температура калориметра и воды?

8. Медный шар, весящий 3 *кг*, был нагрет до 100°С. Затем его погрузили в воду, имеющую температуру 15°С. Ее температура повысилась до 25°С. Сколько было граммов воды?

9. Теплоемкость свинца = 0,031, а механический эквивалент одной калории — 427 *г-м*. На сколько градусов Цельсия повысится температура свинцового шара с массой в 1 000 *г* при падении его с высоты 100 *м*, если вся развившаяся при ударе шара об землю теплота пойдет на нагревание свинца?

ГЛАВА X. 1. Какова температура смеси льда и воды? Как узнать, замерзает или тает эта смесь?

2. Что будет, если к 20 *г* льда при 0°С приложить 1 000 калорий теплоты?

3. Сколько граммов льда надо погрузить в 200 *г* воды при 40° С, чтобы температура ее понизилась на 10°С?

4. Почему айсберги (плавающие ледяные глыбы) часто бывают окружены туманами?

5. Утренний туман обычно исчезает около полудня. Объясните, почему.

6. Почему температура некоторого количества эфира, заключенного в открытой узко-горлой бутылке, будет выше температуры такого же количества эфира, налитого в открытый плоский сосуд?

7. Какое весовое количество воды заключается в комнате, размеры которой

суть 5 × 5 × 3 *м*, если относительная влажность равна 60%, а температура — 20°С? (См. таблицу § 204).

8. Сколько калорий отдают 30 *г*, пара, находящегося при температуре 100°С, при сжижении и остывании до 20°С? Сколько воды сможет этот пар нагреть с 10 С до 20°С?

9. Во сколько раз больше теплоты потребуется для превращения некоторого количества воды при 100°С в пар, чем для нагревания того же количества воды на 1°С? 1°Ф? Сколько надо калорий, чтобы превратить 1 *кг* воды при 90°С в пар? Сколько *г-м* механической энергии эквивалентны этому количеству тепловой энергии?

10. Сколько калорий выделяется в радиаторе при сжижении 5 *кг* пара?

11. Почему при перегонке смеси спирта с водой всегда получается опять-таки смесь спирта с водой?

12. При замерзании некоторой части соленой воды в сосуде образовавшийся лед свободен от соли Разберите, как влияет замерзание на концентрацию остальной части соленого раствора.

13. 1 *г* угля содержит 7040 кал. Сколько *кг* железа надо держать на высоте 50 *м*, чтобы энергия его равнялась энергии 1 *кг* угля?

14. Коэффициент полезного действия среднего локомотива равен, примерно, 9%. Какую мощность развивает этот локомотив, если он потребляет 1 *т* угля в час (см. выше задачу 14)?

ГЛАВА XI. 1. Крепко оберните кусок бумаги вокруг металлического стержня и мгновение подержите его в пламени бунзеновской горелки. Он не спалится. Если же проделать то же самое с деревянным стержнем, бумага сразу спалится. Объясните, почему?

2. Дотрогиваясь до сковороды, находящейся в горячей печи, мы обожжемся гораздо больше, чем при прикосновении к ломтикам хлеба, лежащим на этой сковороде. А между тем температура сковороды и хлеба — одинаковая. Объясните, в чем тут дело.

3. Почему, часто, когда ожидают мороза, растения покрывают на ночь бумагой?

4. Откройте дверь между холодной и теплой комнатой. В каком направлении отклонится пламя свечи, помещенной в верхней части двери?

5. Почему паровые радиаторы надо помещать в холодной части комнаты — около наружных стен или около окон?

6. Назовите главные части трех наиболее употребительных способов домового отопления. Какие физические принципы лежат в основе каждого из них?

7. Положим, что в вашем доме сжигается 2 метр. тонны угля в месяц и одна треть теплоты уходит в трубу. Сколько калорий в день идет на нагревание дома? (Считайте, что 1 *г* угля дает 6 000 кал.; 1 метр. тонна = 1 000 *кг*).

ГЛАВА XII. 1. Не можете ли вы, принимая во внимание явление индукции, объяснить, почему подковообразный магнит сохраняет свои магнитные свойства дольше, если между его полосами поместить стержень из мягкого железа? (См. рис. 216).

2. На расстоянии 20 *см* от магнитного полюса с силой в 30 единиц находится подобный ему полюс с силой в 80 единиц. Найдите силу взаимодействия между ними.

3. Почему в опыте § 276 надо держать стрелку до намагничивания в направлении с запада на восток, чтобы она находилась в безразличном равновесии?

4. Заставим прямолинейный магнит плыть на куске пробки. Будет ли он стремиться плыть к северу? Почему? Попробуйте проделать такой опыт.

5. Подвесим стрелку наклонения к одному плечу весов, не имеющих стальных частей, и тщательно определим ее вес. Затем намагнитим ее. Произойдет ли при этом кажущееся увеличение в весе стрелки? Проделайте это.

6. Как повел бы себя обыкновенный компас, если бы мы поместили его на одном из магнитных полюсов земли? Как повела бы себя в этих же точках стрелка наклонения?

7. Найдите по карте, каково склонение Москвы, Харькова, Калифорнии.

ГЛАВА XIII. 1. Почему отталкивание между телом и наэлектризованным бузинным шариком является более достоверным признаком того, что тело это наэлектризовано, чем их взаимное притяжение?

2. Зарядите электроскоп. Приблизьте затем руку к его шарику (не касаясь его). Листочки сблизятся теснее. Почему?

3. Приблизьте к шарику заряженного электроскопа стеклянную палочку и дотроньтесь ею до шарика. Почему при этом с шарика не уходит находящееся на нем отрицательное электричество?

4. Положим, что вы имеете изолированную сферу, заряженную положительно. Каким образом можно зарядить две другие сферы, одну отрицательно, другую положительно, не уменьшая заряда первой сферы?

5. Две небольших сферы заряжены + 16 и —4 единицами электричества. С какой силой притягивают они друг друга на расстоянии 4 *см*?

6. С помощью рисунка 244 объясните, каким образом, пользуясь машиной Вимшерста, можно получить большой положительный заряд на одной из Лейденских банок и соответствующий отрицательный — на другой.

ГЛАВА XIV. 1. Электрический ток пропускается через два электролитических элемента, соединенных последовательно. В одном элементе медные электроды погружены в раствор сернокислой меди, а в другом элементе платиновые электроды находятся в растворе соляной кислоты. Опишите явления, происходящие на каждом из четырех электродов.

2. Ток силою в 100 ампер отложил в электролитической ванне 6,7 *г* серебра в течение одной минуты. Чему равен электрохимический эквивалент серебра?

3. Сколько времени потребуется току силою в 1 ампер для того, чтобы выделить 1 *г* серебра из раствора азотнокислого серебра?

4. Если бы тот же самый ток, как и в задаче 3, был пропущен через раствор, содержащий соль цинка, то какое количество цинка он отложил бы в течение того же самого времени?

5. Кулон (§ 306) в 3.10^9 раза больше электростатической единицы количества электричества, о которой говорилось в § 280. Сколько электронов проходит в секунду через какую-нибудь определенную точку нити лампочки накаливания, которая питается током силою в 1 ампер (см. § 284)?

6. Если причиной земного магнетизма является вращение вместе с землей электрического заряда на ее поверхности, то какой знак (положительный или отрицательный) должен иметь этот заряд, для того чтобы получились именно те магнитные полюса, которые имеет земля? (В этом и заключается сущность принятой в настоящее время теории земного магнетизма).

7. Электродвижущая сила батареи составляет 10 вольт; сила тока, получаемого через внешнее сопротивление в 4 ома, равняется 1,25 ампера. Чему равняется внутреннее сопротивление батареи?

8. Докажите на основании закона Ома, что в том случае, когда в цепь введены проволоки различных сопротивлений, соединенные последовательно, разности потенциалов между концами отдельных проволочек пропорциональны их сопротивлениям.

9. Почему амперметр, последовательно включаемый в цепь для измерения силы тока, должен обладать возможно малым сопротивлением?

10. Аккумуляторная батарея из 60 аккумуляторов, соединенных последовательно, служит для питания 10 ламп накаливания, соединенных параллельно. Сопротивление горящей лампы равно 190 омам, отдельного аккумулятора — 0,01 ома и магистральных проводов — 0,4 ома. Электродвижущая сила отдельного аккумулятора равна 2 вольтам. Какой силы ток берется от всей батареи? Какой силы ток проходит через каждую лампу?

11. Три сухих элемента (с электродвижущей силой у каждого, равной 1,5 вольта), соединены параллельно для питания 5 маленьких ломпочек, также соединенных параллельно. Какой силы ток дают элементы, если сопротивление отдельного элемента равно 0,1 ома, а сопротивление каждой лампы — 6 омам?

12. Аппарат для электросварки питается током силою в 5 ампер при напряжении в 110 вольт. Сколько будет стоить работа аппарата в течение 5 дней по 6 часов ежедневно при тарифе в 25 коп. за киловатт-час?

13. Электрический ток, проходя сквозь проволочную спираль сопротивлением в 10 омов, нагрел в течение 5 мин. 1 000 *г* воды с 15°С до 61,08°С. Чему равнялась сила тока?

14. Если стоимость электрической энергии составляет 10 коп. за киловатт-час, то во сколько обойдется эксплоатация в течение 48 часов электрического

мотора в 35 HP, у которого коэффициент полезного действия равен 85%? (Одна лошадиная сила равняется 746 ваттам).

ГЛАВА XV. 1. Динамомашина с последовательным возбуждением работает с постоянной скоростью. Как изменится напряжение магнитного поля возбуждения при уменьшении внешнего сопротивления, т. е. при увеличении силы тока? Как изменится при этом электродвижущая сила? (Вспомните, что было сказано в § 358).

2. Если динамо с параллельной обмоткой возбуждения работает с постоянной скростью, то как изменится напряжение магнитного поля возбуждения при уменьшении внешнего сопротивления? Как при этом изменится электродвижущая сила?

3. Лампы накаливания присоединены к магистрали параллельно. При включении каждой лампы общее сопротивление внешней цепи уменьшается. Объясните на основании задач 1 и 2, каким образом динамомашина-компаунд (рис. 321) поддерживает на зажимах постоянную равность потенциалов?

4. С помощью «правила динамо» объясните, почему на рис. 317 и 319 ток в проводниках, находящихся под северными полюсами, идет по направлению к наблюдателю, а в проводниках под южными полюсами — по направлению от наблюдателя.

5. Объясните, почему при пуске в ход электрического вентилятора сила проходящего через него тока значительно больше, чем в том случае, когда скорость вращения вентилятора достигла своей нормальной величины.

6. Мотор питается током силою в 8 ампер и напряжением в 500 ампер; развиваемая им мощность равняется 5HP. Чему равняется его коэффициент полезного действия?

7. Если на рис. 317 ток входит в якорь в точке b' и выходит из него в точке b, то в каком направлении вращается якорь?

8. Докажите, что если бы был справедлив закон, обратный закону Ленца, то мотор, приведенный во вращение, продолжал бы сам вращаться и производить работу, т. е. что мы имели бы случай вечного движения (perpetuum mobile).

9. Искра в индукционной катушке появляется при замыкании или при размыкании? Почему?

10. Почему сердечник якоря должен быть изготовлен из плоских дисков, как на рис. 330, а не из коаксиальных железных цилиндров во всю длину якоря?

11. Трансформатор понижает напряжение для осветительных целей с 2200 вольт до 110 вольт. Изобразите схематически трансформатор и его соединения, отметив первичную и вторичную обмотку и указав, в каком отношении находится друг к другу число витков в каждой из них. Если домашняя проводка потребляет ток силою в 40 ампер, то какой силы ток должен проходить в первичной обмотке трансформатора?

ГЛАВА XVI. 1. Посты A, B и C находятся на одной прямой на расстоянии одного километра друг от друга. Неприятельский выстрел слышен в A и C одновременно, а в B на две секунды позже. Найдите, где находится неприятельское орудие, если температура воздуха равняется 20°C.

2. Пуля, вылетевшая из ружья со скоростью 366 *м* в секунду, ударилась о мишень, причем звук от удара дошел до стрелка через 6 сек. после выстрела. На каком расстоянии находилась мишень, если температура воздуха равнялась 20°C?

3. Как изменится сила звука на расстоянии в 700 *м* от источника по сравнению с расстоянием в 350 *м*, если при этом не происходит отражений звука?

4. Почему люди с ослабленным слухом прикладывают руку к уху?

5. Если самый низкий тон, воспринимаемый ухом, обладает частотой, равной 16 колебаниям в секунду, то какой наибольшей длины волны звук может быть воспринят в воздухе при 0°C?

6. Звук камертона усиливается, если держать последний над закрытым воздушным столбом в 10 *см* длиной; далее резонанс получается, если длина воздушного столба составляет 15 *см*. Найдите частоту колебаний камертона. Температура воздуха равна 20°C.

7. Пассажир курьерского поезда, движущегося со скоростью 1,5 *км* в минуту, слышит колокольный звон, который доносится с находящейся перед ним башни. Если колокол производит 280 колебаний в секунду, то какое количество звуковых импульсов достигает ежесекундно уха наблюдателя? (Скорость

звука равна 336 *м* в секунду. Избыток звуковых импульсов, сообщаемых уху в течение секунды, равен количеству длин волн, укладывающихся в расстоянии, которое поезд проходит в течение секунды). Как изменится при этом высота звука? Если поезд с той же самой скоростью удаляется от колокола, то какое количество звуковых импульсов достигало бы ежесекундно уха наблюдателя? Как изменилась бы при этом высота звука?

ГЛАВА XVII. 1. Какова высота звука, длина волны которого равна 5,4 дм. при скорости звука равной 1152 фута в сек.?

2. Две струны, длиною в 6 фут. каждая, совершают 256 колебаний в секунду. Если одну из этих струн удлинить на 2,5 *см*, то сколько биений в секунду получится при этом?

3. Если колеблющаяся струна, натягиваемая силою в 4 *кг*, дает ноту *C*, то с какой силой должна быть натянута струна для получения: 1) ноты *E*? 2) ноты *G*?

4. Какова должна быть длина закрытой органной трубы для того, чтобы она давала ноту *E*? (Скорость звука примите равной 340 *м* в секунду).

5. Какой нотой является первый обертон открытой органной трубы, дающей ноту *G*?

6. Какой нотой является первый обертон закрытой органной трубы, дающей ноту *G*?

ГЛАВА XVIII. 1. Земля посылает Луне в 16 раз больше отраженного света, чем Луна—Земле. Почему мы не в состоянии видеть темную часть Луны, ущербленной на одну четверть?

2. Если нарисовать белой краской слово «белый» на поверхности зеркала и держать последнее в темной комнате на пути пучка солнечного света, то на поверхности, куда упадет отраженный пучок, в середине светлого пятна появится слово «белый», составленное из черных букв. Объясните причину этого явления.

3. Диаметр Луны равен 1715 *км*, диаметр Солнца — 686 700 *км*, расстояние от Луны до Солнца равно 150 378 000 *км*. На какое расстояние простирается тень от Луны?

4. Если бы расстояние от центра Земли до центра Луны равнялось в точности расстоянию, на которое простирается тень Луны, то какое пространство на Земле занимала бы область полных солнечных затмений?

5. Взгляните на отражение нити лампы накаливания в куске красного стекла. Почему вы видите два изображения, одно красное и одно белое?

6. Если 4-свечевая лампа дает достаточно света для чтения на расстоянии 30 *см*, то на каком расстоянии следует поместить 64-свечевую лампу для получения той же самой освещенности? Какой силы лампу следует поставить на расстоянии 240 *см* от книги?

7. Если страницы книги достаточно сильно освещены 20-свечевой лампой, находящейся на расстоянии 90 *см*, то какое количество свечей потребуется в лампе, помещенной на расстоянии 150 *см*?

8. Луна почти не имеет атмосферы. Действительно, об этом свидетельствует, например, то обстоятельство, что при кажущемся прохождении звезды мимо Луны не происходит уменьшения или увеличения кажущейся скорости звезды в тот момент, когда она исчезает из вида или появляется вновь. Если бы Луна обладала атмосферой, похожей на земную, то как это повлияло бы на кажущуюся скорость звезды в эти оба момента?

9. Кажется ли рыбе, что человек над поверхностью воды находится дальше от поверхности или ближе, чем на самом деле? Для объяснения сделайте чертеж, схематически изображающий распространение световых волн в рассматриваемом случае.

10. Когда свет проходит под некоторым углом из воздуха в сероуглерод, он испытывает большее отклонение, чем в том случае, когда он по тем же самым углом переходит из воздуха в воду. Скорость света в сероуглероде больше или меньше, чем в воде?

ГЛАВА XIX. 1. Фотографию в 6×9 *см*^{2} требуется увеличить до размеров 24×36 *см*^{2}. Если расстояние между фотографией и ее увеличенным изображением составляет 1 *м*, то какова должна быть длина фокусного расстояния чечевицы?

2. Если укрепить розу *R* внутри ярко освещенного ящика, как показано на рис. 493, то с помощью вогнутого зеркала *C* можно получить действительное

ее изображение в стакане с водой W (рис. 493). Где должен быть помещен глаз наблюдателя, для того чтобы увидеть это изображение?

3. Как далеко от зеркала находится роза в опыте, изображенном на рис. 493?

4. (1). Чему должно равняться фокусное расстояние объектива в фотографическом аппарате, предназначенном для фотографирования отдаленных предметов на пластинке, помещенной на расстоянии 2 *м* позади объектива? (2) На каком расстоянии от пластинки должен быть помещен такой объектив для правильной фокусировки предмета, находящегося на расстоянии 3 *м* от объектива?

5. Ребенок ростом в 91 *см* находится на расстоянии 4,5 *м* от фотографического аппарата, в котором фокусная длина объектива составляет 45 *см*. Чему равняется расстояние от объектива до фотографической пластинки, а также каковы размеры ребенка на фотографии?

6. Изображение книги, находящейся на расстоянии 30 *см* от глаза, получающееся на ретине, больше чем изображение дома, находящегося на противоположной стороне улицы. Почему мы не заключаем на основании этого, что книга действительно больше дома?

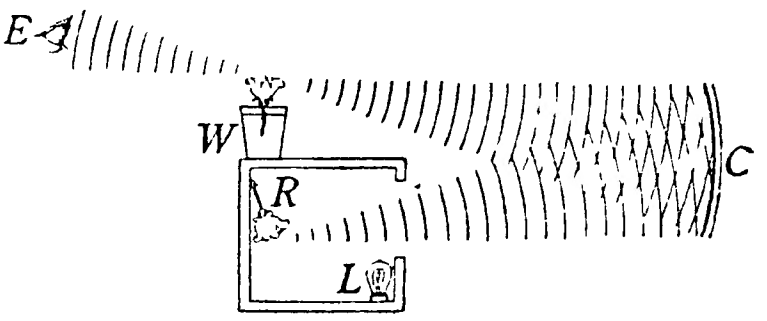


Рис. 493.

7. Постарайтесь объяснить, каким образом получается в телескопе изображение, которое вы видите?

8. Длина тубуса в сложном микроскопе равна 20 *см*, фокусная длина объектива — 1,3 *см* и фокусная длина окуляра — 2,5 *м*. Каково его увеличение?

9. Если фокусное расстояние глаза составляет 2,5 *см*, то чему равно увеличение, даваемое театральным биноклем, у которого фокусная длина объектива составляет 10 *см*?

10. Параболическое зеркало, применяемое в качестве объектива одного из телескопов обсерватории на горе Вильсон, имеет диаметр 2,5 *м* и фокусное расстояние около 15 *м*. Какое увеличение получается с окуляром в 5 *см*; с окуляром в 2,5 *см*? Какая выгода получается от применения зеркала такого огромного диаметра?

ГЛАВА XX. 1. Показатель преломления стекол будет ли один и тот же для красного и зеленого света? Подробно мотивируйте ваш ответ.

2. Если скорость света в пустоте составляет 300 000 *км-сек.*, то какова скорость распространения желтого света сквозь алмаз, показатель преломления для которого равен 2,47?

3. Чем объясняется призрачный вид лица, освещаемого ртутной дуговой лампой Купера-Хьюитта?

4. Можете ли вы объяснить, почему колеблющиеся молекулы светящегося раскаленного газа должны испускать небольшое определенное число длин волн, между тем как частицы светящегося раскаленного твердого тела дают всевозможные длины волн?

5. Можете ли вы объяснить, почему для демонстрации фраунгоферовых линий в опыте § 477 необходимо иметь узкую щель и кроме того поместить щель и экран в сопряженных фокусах чечевицы?

6. Если осветить мыльную пленку расположенными рядом красной, зеленой и желтой полосками света, каково будет расстояние между желтыми кольцами по сравнению с расстоянием между красными кольцами? По сравнению с расстоянием между зелеными кольцами? (см. таблицу на стр. 435).